



EESTI MAAÜLIKOOLI TAASTUVENERGIA KESKUS  
ja  
EESTI NOORTE TEADLASTE AKADEEMIA

# NOORTEADLASED TAASTUVENERGIAST

Tartu  
2007



Eesti Noorte Teadlaste Akadeemia  
[enta@enta.ee](mailto:enta@enta.ee)  
[www.enta.ee](http://www.enta.ee)

**Toimetanud** Illar Leuhin ja Dmitri Teperik

**Trükkunud** K-Tolliblankeetid OÜ  
Mustamäe tee 55 10621 Tallinn

ISBN 978-9949-15-496-8

## Sisukord

Eessõna .....	4
Ääremärkusi taastuenergia ja jätkusuutlikkuse teemadel <i>Jaanus Kiili</i> .....	5
Koolikogemusi taastuenergeetika teemadest <i>Jaanus Uibu</i> .....	8
Torma biogaasijaam <i>Arno Raadom</i> .....	19
Kolme huvipoolle suhtumine tuuleenergia tootmisesse Eestis <i>Janar Õunpuu</i> .....	24
Reovee jääkmuda mõju paju kasvule <i>Kaili Kattai</i> .....	31
Pelletipõletuskatla PELLE soojustehniliste karakteristikute määramine <i>Kristjan Plamus</i> .....	43
Bioenergiakultuuride kasvatamise võimalused põllumajanduslikust kasutusest väljajäänud maal Ida- Viru, Järva ja Tartu maakondades <i>Liia Kuke</i> .....	53
Arukaasikud endistel põllumajandusmaadel <i>Merit Kund</i> .....	63
Paju-pigirooste ( <i>Melampsora epitea</i> ) suvicoslate arvukus Eesti energiavõsa istanduste erinevatel pajukloonidel <i>Merje Toome</i> .....	73
Põhugraanulite tootmistehnoloogia <i>Mihkel Laur</i> .....	82
Metaantanki soojustehnilised parameetrid <i>Vaiko Vinnal</i> .....	91
Biogaasi pooltööstusliku katsereaktori pilootprojekt <i>Veiko Proovel, Vano Kupatadze</i> .....	97
Eesti Maaülikooli taastuenergia keskusest <i>Elis Vollmer</i> .....	111
Eesti Noorte Teadlaste Akadeemiast <i>Dmitri Teperik</i> .....	112



## Eessõna

Juba teist aastat on Eesti Noorte Teadlaste Akadeemia ja Eesti Maaülikooli taastuenergia keskus ühendanud oma jõud, et esitleda ühisprojekti tulemusena valminud kogumikku. *Noorteadlased taastuenergiast* koondab endas eelkõige samanimelisele konkursile laekunud paremaid artikleid Eesti Maaülikooli, Tallinna Ülikooli ja Tallinna Tehnikaülikooli noorteadlaselt.

Ehkki käesolev kogumik keskendub peamiselt taastuenergia valdkonna mitmekülgsel tutvustamisele ja teaduslikule analüüsile, usun, et tegemist on laiemalegi lugejaskonnale huvipakkuva materjaliga, sest sisaldab ka teiste asjatundjate populaarteaduslikke mõtisklusi, mis kajastavad teemat erinevatest vaatenurkadest. On rõõmustav tõdeda, et taastuenergia on uurimisteedmana noorteadlaste seas üsna populaarne, mis on lootustandvaks märgiks selle olulise valdkonna arengus.

Käesoleva kogumiku teiseks oluliseks rolliks on võimaldada noorteadlastel oma esimesi teadustöid eesti keeles avaldada, et seeläbi valdkonna probleematika kohalikule lugejaskonnale adresseerida. Eesti teaduskeele säilimise seisukohast ei tohiks sedagi tegurit alahinnata. Taastuenergeetika on valdkond, mille innovatiivne rakendamine kohalikes oludes on strateegilise tähtsusega nii keskkonna aspektist kui ka regionaalmajanduslikult.

Noorteadlaste akadeemiliste ja sotsiaalmajanduslike muredega rohkem kui kolm aastat kokku puutununa tervitan SEB Eesti Ühispanga algatust teadustööde konkursi ja konverentsi toetamisel. Erasektori huvi teaduses toimuva vastu on arenevale ühiskonnale pandiks edukate riikide sekka jõudmisel.

Dmitri Teperik, *M.Sc.*

Eesti Noorte Teadlaste Akadeemia juhatuse esimees

Euroopa doktorantide ja noorteadlaste nõukogu juhatuse liige

# Ääremärkusi taastuenergia ja jätkusuutlikkuse teemadel

Jaanus Kiili

Tallinna Tehnikaülikooli humanitaar- ja sotsiaalteaduste instituut

Elame maailmas, kus inimeste arv jätkuvalt suureneb. Elanike arvu kasvu soodustab kvaliteetsemast arstiabist tingitud üha madakam suremus mitte ainult arenenud, vaid ka arenevates maades. Iga organism, sealhulgas ka inimene, vajab elus püsimiseks eelkõige toitu, vett ja hapnikku. Kuid lisaks soovib inimene üha suuremas koguses erinevaid olmemugavusi. Paljud neist on muutunud meie arvates igapäevasteks ja normaalseks. Enamik olmemugavusi on seotud energia otsese või kaudse tarbimisega. Seega, mida suurem on inimeste hulk planeedil Maa, seda rohkem energiat tabitakse. Küsimus on vaid selles, milline kogus tarbitavat energiat ühe inimese kohta on aktsepteeritav ning kes ja millistest kriteeriumidest lähtuvalt selle taseme määrab? Kuivõrd siduvad on need soovitusel? Kuidas tagada selliste otsuste reaalset rakendamist olemasoleva ning tulevikus kardetavasti suureneva rahvusliku, usulise jne egoismi olukorras? Kuidas piirata kiiret kasvu ning asendada see kvalitatiivse arenguga, kuidas seda konkreetsele, näiteks kristlusest erineva kultuuritustaga inimestele seletada? Veelgi enam – kuidas neid sellele teele suunata? Kas väike- ja suurrahvad on inimeste arvu suurenemise piiramises ühesuguses olukorras või peaks esimestele tegema mingi erandi?

Diskussioon jätkusuutliku arengu olemusest on juba alates 1972. a ÜRO keskkonna-konverentsist Stockholmis taandunud erinevatele konfrontatsioonidele: majanduskasv või keskkonnakaitse, rikkad ja vaesed riigid, arenenud ja arenevad maad. Taustaks on erinevad arusaamised maailma viimaste aastakümnete arengutest, jätkusuutliku arengu sisust ning poliitilistest prioriteetidest. Läänemaailmas tunnistab enamik uurijaist jätkusuutliku arengu kolme aspekti – keskkondlikku jätkusuutlikkust, sotsiaalset vastutust ning majanduslikku edukust nii organisatsioonide kui ka üksikisikute tasemel. Kuidas aga suhtuvad probleemi aafrikalased, asiaadid ja moslemi ühiskonnad, me tegelikult ei tea! Nende ees seisavad Läänemaailmaga võrreldes hoopis teist laadi väljakutsed. Idee poolest peaksid ühiskonna sotsiaalmajanduslikus elus kolm eeltoodud kriteeriumi olema rakendatud koos ja läbipõimunult. Siiski pole see alati nii, mistõttu võime märkida, et jätkusuutlikkus on paljudes valdkondades ja sotsiaalsetes gruppides muutunud omamoodi poliitiliseks loosungiks ning tänases maailmas on olemas erinevad kontseptsioonid jätkusuutlikust arengust kui sellisest. Säästva ehk vastutustundliku ja jätkusuutliku arengu kontseptsioonis on ideid, mida tõlgendatakse küllaltki erinevalt, tulenevalt vastustest järgnevale probleemidele.

Kui me tunnustame, et sotsiaalne ja majanduslik praktika ning looduslik keskkond on lahutamatud, siis see tähendab sotsiaalmajandusliku arengu ja keskkonnakaitse ühendamist. Kuid millise rolli ja tähenduse me oleme valmis keskkonnakaitsele andma? Kas me eelistame keskkonnakahjustele majanduslikku kasu ja poliitilist populaarsust? Kas mõned keskkonnakahjud võivad olla olulised ainult teatavale vähemusele ning kui see on nii, kas ja kuidas me peaksime nende huve arvestama ja kaitsma? Kas inimese loodud ja looduslik kapital on omavahel võrreldavad või on olemas mingi loodusliku kapitali nivoo või kogus või määr, mis on jätkusuutliku arengu mõttes kriitiline? Teiste sõnadega, kui palju me võiksime looduslikku kapitali ära kulutada, ilma et süsteemi kui terviku tasakaalu häiriksime?

Jätkusuutliku arengu idee rõhutab järgnevate põlvkondade huvidega arvestamise olulisust. Milles aga seisnevad tulevaste põlvkondade konkreetsed huvid ning mida nendega arvestamine tähendab igapäevase praktika mõttes? Mida me peame hoidma-säilitama ja mida mitte, kuhu tõmmata piir ja kes seda otsustab?

Mida tähendab *keskkonna kaitsmine*? Kas see tugineb siis teaduslikus või emotsionaalses mõttes huvitavate loodusobjektide ning -komplekside säilitamise ideele või tähendab see elamist mingi

loodusliku bioregiooni keskkonnamahatuvuse raamides? Kui otsustame viimase kasuks, siis kas me olema valmis tunnustama inimesega mitteseotud looduse iseseisvat väärtust ja seisundit näiteks Arne Naessi süvaökoloogia või bioregionalismi ideedest johtuvalt? Mida teha siis, kui elanikkonna enamik pole selleks valmis ning kas sellega seoses on aktsepteeritavad ka vägivaldsed vahendid näiteks Pentti Linkola vaimus? Kuidas ja kellele ning millisel määral me tagame sotsiaalse õigluse (J. Rawles'ist lähtudes) keskkonna suhtes?

Mida hõlmab elu kvaliteet – kas majanduslik turvalisus on sobiv ja piisav ühiskonna heaolu indikaator või lisanduvad veel mingid teised? Kas arenenud ja arenevate maade puhul saab rakendada samu elu kvaliteedi mõõdikuid? Kuidas sobitada kokku inimese individuaalne õnnelikkus ning kogu ühiskonna ehk globaalse maailma huvid, kuna ühiskond, mille üksiklikmed on õnnetud, ei saa olla õnnelik!

Nii praeguste kui ka tulevaste põlvkondade elukvaliteedi tagamiseks peab olema piisavalt põllu-, karja- ehitis- jne maad, joogi- ja tarbevett ning energiat. Viimasel kümnendil on taas esile kerkinud toiduainete tootmise ja jaotamise küsimus – Aasia ja Lähis-Ida kasvavad inimpopulatsioonid ei suuda suurenevaid toiduvajadusi oma territooriumil rahuldada. Sellele lisandub põllumajanduseks sobivate maade pindala vähenemine neis maades, tingituna kohati kõrbestumisest, kohati elamuehitusest, kohati tööstuse arendamisest. Tulemusena kannatab rohkem kui 3,7 miljardit inimest ajutise või pideva alatoitumuse all. Tendents on pigem probleemi süvenemisele kui kergetele lahendustele. Sellest tulenevalt on globaalselt lähtudes äärmiselt oluline säilitada toiduteravilja kasvatamiseks sobivaid põllualasid, mageveeresursse, energiat ning bioloogilisi ressursse. Seejuures on oluline taastuvenergia ressursside jätkusuutlik majandamine eriti just kohalikul tasandil. Parasvöötmes asuvad põllumaad on subtroopika ja troopika aladega võrreldes eeliseisundis ning neil on suur potentsiaal kujuneda kiire rahvastiku kasvuga ning üldise elatustaseme tõstmisele orienteeritud Araabia ja Aasia maade toidulaoks. Seega, kui õigustatud on pikas perspektiivis kasvava toiduresursside nappuse olukorras põllualadel massiline energiakultuuride kasvatamine?

Energia on inimühiskonna eluoluks võtmetähtsusega, mistõttu stabiilsete energiatarvete tagamine on moodsate ühiskondade sotsiaalmajandusliku jätkusuutlikkuse tagamiseks otsustava tähtsusega rahvusliku stabiilsuse ja julgeoleku küsimus. Fossiilsete kütuste kasutamine endisel viisil pole enam kuigi pikalt võimalik. Vastavad ressursid on ammendumas, globaalne soojenemine ja kaasnevad keskkonnaprobleemid muutuvad üha ilmsemateks, sagenevad geopoliitilised ja sõjalised konfliktid ning fossiilkütuste hind turul kasvab. See viitab moodsa ühiskonna suurenevale energeetilisele mittejätkusuutlikkusele ning sunnib erinevaid ühiskondi (Lääne kristlikke, Aasia budistlikke-taoistlikke) aktiivselt otsima väljapääsu läbi alternatiivsete energiaallikate rakendamise ning efektiivsema energiasäästu.

Taastuvenergia katab umbes 14% kogu maailma energiavajadusest. Seejuures, arenenud riikides domineerivad taastumatud, kuid energeetiliselt efektiivsemad energiaallikad, arenevates maades aga taastuvenergia-allikad. Taastuvenergiaallikateks on biomass, hüdroenergia, geotermaalne energia, päikese, tuule ja mere energia. Nende suhteline osakaal on aga väga erinev – domineerivad biomass (1995. a – 62,1%) ja hüdroenergia (20%), teised taastuvenergia liigid on olulised kas paikkonniti või sesoonselt.

Euroopa Liidu eesmärk aastaks 2010 on toota 15 liikmesriigis 22,1% kogu elektrist, tuginedes taastuvenergia ressurssidele. Eesti jaoks on vastav näitaja ca 5%. Võtmeküsimuseks on, kust saada odava tarnehinnaga biomassi elektri tootmiseks. Seejuures pole probleem mitte ainult selles, milliseid kultuure kasvatada vaid ka kus seda kasvatada. Kas teistes riikides ja odava tööjõu baasil? On selge, et transpordikuludest tulenevalt ei saa see biomassi-varaait olla energiatootmisjaamast väga kaugel. Sellises olukorras peab Eesti valima, kas ta hakkab maailmaturul üha nõutavama toiduteravilja asemel kasvatama odavaid energiakultuure rikkamatele naaberriikidele biomassi baasil toodetava energia saamiseks. Kasvava globaalse toidudefitsiidi taustal on oluline tagada ka Eesti riigi senisest suurem

sõltumatus just sisseveetavatest toiduainetest ning muutuda esmajärjekorras toidu ja alles seejärel bioenergiaallikate eksportijaks – nafta ei kõlba teatavasti juua ega maagaas hingata! Paljudel juhtudel pole ei kohaliku ega ka imporditava biomassi baasil ühiskonna sotsiaalmajanduslikku stabiilsust tagava piisava koguse energia tootmine üldse reaalne, mistõttu Euroopa Liidus kaalutakse üha sagedamini kliimamuutustest tulenevate CO<sub>2</sub> emissiooni vähendamiskohustuste taustal ning energeetilise julgeoleku ja sõltumatuse tagamiseks tuumaenergia senisest ulatuslikumat kasutamist eelkõige elektrienergia tootmiseks. Mis saab transpordist, seda ei julge hetkel veel keegi ennustada. Ilmselt on sellises olukorras väikestel Põhja-Euroopa riikidel kõige otstarbekam kasutada integreeritud lähenemist, rakendades erinevaid taastuvenergiaallikaid ja kasutades energiat senisest efektiivsemalt. Oluliseks küsimuseks jääb ka inimeste valmisolek oma seniseid olmeharjumusi ja väärtushinnanguid muuta.

Kõik ühiskonnad kulutavad võimaluse avanedes suhteliselt palju energiat olmemugavuse tagamiseks elamutes: jahedamates piirkondades kütmiseks, soojemates aga jahutamiseks. Mida rohkem inimesi omab selleks majanduslikke võimalusi, seda rohkem energiat kulub. Nende energiakoguste vähendamise ühe võimalusena nähakse uutmoodi ehitisi, vastavate ökoehitiste standardide kehtestamist ning rakendamist riiklike tegevuskavade alusel. Sellised uued ehitusnormid peaksid varieeruma sõltuvalt paikkonna sesoonsest ilmastikust ning üldisest kliimast. Tähelepanu all on eriti hoonete välispiirete soojuspidavus, ventilatsioonisüsteemide põhimõtteline lahendus (loomulik *versus* mehaaniline), uusehitiste paigutamine ilmakaarte suhtes (päikeseküte), elamupiirkondade mikrokliima, seljuures kohalik haljastus. Põhiprobleemiks jääb aga erinevate sissetulekurühmade võimekus neid uuendusi rakendada ning riigi ja kohaliku omavalitsuse roll vastavate protsesside algatajana ja suunajana.

Taastuvenergiaallikate ulatuslikum kasutamine loob võimaluse kohalike, erinevaid ressursse tarvitavate energiajaamade kohalike ja rahvusvaheliste võrgustike kujunemiseks. Kujunev hajus energiatootmine johtuvalt kohalikest vajadustest tagab võimaluse efektiivsemalt kasutada erinevaid taastuvenergiaallikaid ning vähendada sõltuvust fossiilsetest kütustest. Biogaasi tootmine ja kasutamine võiksid olla võimaluseks ka Eestis, kui taas kerkib küsimus, kust saada piisavas koguses odavat biomassi ning kas toodetud energia hind on nõ konkurentsivõimeline.

Taastuvenergia ja piirkonna jätkusuutlikkus on kompleksed probleemid, mille koosvaatlemine on eelduseks ühiskonnas pikemas perspektiivis toimivate lahenduste või leevenduste otsimisel.

# Koolikogemusi taastuvenergeetika teemadest

Jaanus Uibu

Tartu Ülikooli haridusteaduskond

Käesolev kogumik tutvustab lugejale mitmeid talendikate Eesti noorteadlaste osalusel valminud uurimusi, mis loodetavasti annavad tõhusa panuse fossiilsete kütuste asendamiseks keskkonnasõbralikumate taastuvate allikatega. Nende kaante vahel leiduvad kirjatööd on autorite pikaajalise haridustee viljadeks. Loomulikult ei saa siin alahinnata ülikoolide ning sealsete entusiastlike spetsialistidest juhendajate rolli. Ent andekate noorte jõudmisel keskkonnaga seotud erialadele on siiski üheks määravaimaks teguriks kool, täpsemalt üldharidussüsteemi suutlikkus äratada õpilastes huvi keskkonna ja säästva arengu teemade vastu. Käesoleva kirjutisega ongi püütud anda põgus ülevaade, millised võimalused avanevad Eesti kooliõpilasele taastuvenergeetika teemadega tutvumiseks.

## Taastuvenergeetika tutvustamise olulisus

Enamik ühiskonnateadlaste pakutavaid tulevikuprognose näeb käesoleva sajandi suurimate väljakutsetena ette globaalse keskkonnaseisundi halvenemist ja konflikte loodusressursside nappuse tõttu. Siin on üheks põhiteguriks globaalse tööstustootmise ja energiavajaduse järsk kasv seoses rahvaarvu kiire tõusu ja arengumaade hooga industrialiseerumisega. Ilmselt olulisimaks ressursside rühmaks on energiavarad – tööstuse, transpordi ja moodsa eluviisi käigushoidjad. Kahe viimase sajandi majanduskasvu ja progressi kütuseks on sõna otseses mõttes olnud maapõuest pärinevad, sadu miljoneid aastaid tagasi ladestunud ja muundunud orgaanilise päritoluga süsinikuühendid: kivi- ja pruunsüsi, nafta, maagaas. Neid nimetatakse fossiilseteks kütusteks ja nende ühiseks omaduseks on taastumatus. Ühel päeval on nende varud vähenenud tasemeni, mille puhul ammutamine pole enam mõttekas. Millal see juhtub, selles ei ole eksperdid üksmeelel, aga on ilmne, et 21. sajandi jooksul peab inimkond senise majandusliku ja ühiskondliku arengu säilitamiseks leidma uusi energeetikalahendusi. Seoses fossiilsete kütuste varude vähenemise ja kaasneva hindade tõusuga suureneb aasta aastalt nõudlus alternatiivide järele.

Teiseks oluliseks põhjuseks, miks alternatiivenergeetikat üha enam tutvustatakse ja propageeritakse, on fossiilsete kütuste keskkonnoahtlikkus. Ühest küljest kahjustab keskkonda juba nende kaevandamine ja ammutamine – kõik on ilmselt kursis lokaalsete probleemidega kaevanduspiirkondades, samuti suurte merereostustega, mida põhjustavad tankeriõnnetused. Rügipiire ületavaks ohuks on aga fossiilsete kütuste põletamisel eralduvad ühendid: happesademeid põhjustavad väävli- ja lämmastikuoksiidid ning kliimamuutusi esile kutsuvad kasvuhoonegaasid. Tänapäevaks on maailma juhtivad kliimateadlased jõudnud üksmeelele, et valitseb otsene seos fossiilsete kütuste põletamise hoogustumise, viimaste kümnendite jooksul täheldatud süsinikdioksiidi ja teiste kasvuhoonegaaside atmosfäärikontsentratsiooni kasvu ja Maa keskmise õhutemperatuuri tõusu ehk kliima soojenemise vahel. Viimane asjaolu omakorda tingib ulatuslikke muutusi Maa kompleksses ilmasüsteemis: jääliustike sulamist, sademete ümberjaotumist, hoovuste tugevuse ja suuna muutusi jne. Kõrgema temperatuuriga kaasneb rohkem energiat – nii muutuvad ilmastikuprotsessid üldjoontes intensiivsemateks ning suureneb mitmesuguste looduskatastroofide hulk ja võimsus. Kõik need negatiivsed protsessid seavad tugeva löögi alla nii looduskeskkonna kui ka inimese. Elukeskkonna halvenedes ja ressursside lõppedes hoogustuvad rahvaste ränded ja kasvab relvakonfliktide oht. Just sellele temaatikale üldsuse tähelepanu juhtimise eest pälvisid USA ekspresident Al Gore ja ÜRO Valitsustevaheline Kliimamuutuste Komisjon aastal 2007 Nobeli rahupreemia. Kui soovime tagada inimväärsel elukeskkonnal ka pärast meid tulevatele põlvkondadele, siis oleme kohustatud andma oma panuse sellise enesehävitusliku toimimisviisi lõpetamiseks. Seega



on möödapääsmatu otsida võimalusi fossiilsete kütuste asendamiseks alternatiivsete, keskkonnasõbralike energiaallikatega. Keskkonnasõbralikke lahendusi väärtustav mõtteviis peaks juurduma juba koolis, et noor oskaks aktiivsesse kodanikuikka jõudes langetada põhjendatud valikuid ja öelda sõna sekka ühiskondlikus energiadebatis.

## Eesti-siseseid põhjused

Eestiski ei ole energiatemaatika vähem aktuaalne kui mistahes teises maailma riigis. Meie elektrienergeetika on juba aastakümneid tuginenud kohaliku fossiilse kütuse – põlevkivi – kaevandamisele ja põletamisele Narva elektrijaamades. Vaatamata kõigile viimasel kümnendil juurutatud abinõudele keskkonna säästmiseks, kaasneb põlevkivienergeetikaga ikkagi suur surve keskkonnale, niinimetatud *ökoloogiline jalajälg*. Kaevandused mõjutavad nii looduslikke kooslusi kui ka põhjavee taset, soodustavad raskmetallide jt mürgiste ühendite sattumist veeringesse, põjustavad mürareostust ja nõuavad ammendudes suuri kulutusi keskkonna taastamiseks. Põlevkivi põlevaine sisaldus ja seeläbi kütteväärtus on väga tagasihoidlikud isegi võrreldes kivi- ja pruunsöega. Sellest asjaolust tulenevaid hiiglaslikke aherainemägesid võib küll tõlgendada ka maastiku ilmestajana ja näha neis isegi võimalusi talispordi arendamiseks, samas pole lõpuni selge, mil määral eraldub neist põhja- ja pinnavette keskkonnoahtlikke ühendeid. Atmosfääri paisatavad põlemisgaasid annavad aga märgatava panuse happesademetekkesse ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ) ja kasvuhooneefekti tugevdamisse ( $\text{CO}_2$ ), halvendades ühtlasi Eesti positsiooni rahvusvahelisel kasvuhoonegaaside emissiooni turul. Euroopa Liidu keskkonnanõuded tingivad hiigeltahvide ähvardusel Narva elektrijaamades kasutatavate aegunud põlevkivikatelde väljavahetamise juba aastaks 2016. Sellega omakorda kaasneksid kümnetesse miljarditesse kroonidesse ulatuvad kulutused.

Olukorra tõsidust on mõistnud ka Eesti võimuorganid. Nii on kütuse- ja energiamajanduse riiklikus arengukavas võetud kohustus aastaks 2010 kasvatada Eestis taastuvelektri osakaal 5,1%-ni brutotarbimisest. Lisaks kiitis valitsus 2007. aasta alguses heaks *Biomassi ja bioenergia kasutamise edendamise arengukava aastateks 2007...2013*, mille eesmärgiks on bioenergia arendamise kaudu vähendada Eesti sõltuvust import-energiavaradest ja fossiilkütustest. Investeeringuid bioenergia tootmisse hakatakse toetama läbi *Eesti maaelu arengukava 2007...2013* meetmete. Lisaks on ette valmistatud energiasäästu sihtprogramm 2007...2013 energiasäästu abinõude rahastamiseks ja info levitamiseks. Eesti teadus- ja arendustegevuse ning innovatsiooni strateegia 2007...2013 elluviimiseks on loomisel riiklik energiatehnoloogiate programm, mille üheks eesmärgiks on kohalike taastuvate energiaallikatega seotud tehnoloogiate arendamine [21]. Taastuenergia tootjatele on samas riiklikult loodud tulusad tingimused elektri müümiseks *Eesti Energia* võrku. Kõigi nende meetmete taustal on möödapääsmatu ka panustamine haridusse, et viia tulevased energiaprobleemide lahendajad aegsasti kurssi energeetikaga seonduvate väljakutsetega.

## Õppijat kaasavad meetodid taastuenergeetika õppimisel

Lisaks traditsioonilisele, klassiruumis toimuvale õppetööle, mis siiski võib hõlmata ka aktiivõppe meetodeid, näiteks rühmatööd, diskussiooni, dispuuti jne, leidub rohkesti võimalusi tutvustada alternatiivenergeetikat õppijaid veelgi enam kaasavas vormis. Siia kuuluvad muuhulgas referaadid ja uurimistööd, projektid, õppekäigud ja -ekskursioonid energeetikaobjektidele.

## Referaadid, uurimused, projektõpe

Õpetaja jaoks lihtsaimaks ja ilmselt ka praktikas enim kasutatavaks võimaluseks suunata õpilased energeetikateemadega süvitsi tutvuma on anda neile ülesandeks koostada *referaat*. Õppekava arvestades sobib see alates 9. klassist. Teemavalik võiks hõlmata kõiki olulisemaid kütuseid ja muid

energiavarasid, kusjuures käsitleda tasuks nii vastava ressursi leidumist, hankimistehnoloogiaid, kasutamise ajalugu, keskkonnamõjusid, majanduslikku tasuvust jne. Samas võib ka maailma ühiskonnageograafia kursuse raames mingi riigi kohta ettevalmistatavasse referaati kaasata energeetika teema ja sellel hiljem võrdlevalt peatuda. Referaati koostades arenevad mitmed õpioskused, muuhulgas ka info otsimise ja selle töötlemise oskus. Referaatide ettekandmisel ja nende üle diskuteerides saab ideaalis kogu klass võrdleva ülevaate peamistest energiaallikatest.

Võimekamate ja valdkonnast enam huvituvate õpilaste juhatamisel energeetike juurde on heaks lahenduseks mahukamad *uurimistööd*, mida võib teha nii pädeva ja entusiastliku aineõpetaja kui mõne erialaspetsialisti juhendamisel, eriti gümnaasiumi astmes. Nii teoreetilist kui ka praktilist laadi õpilasuuringud arendavad arusaama teaduslikust meetodist ja pakuvad rikkalikult kogemusi iseseisvaks teadustööks, hõlbustades hiljem toimetulekut kõrgkoolis. Samas leidub õnnestunud uurimistöödele ka vahetu väljund Haridus- ja Teadusministeeriumi, SA Archimedese, teaduskeskuse AHHA ning Tallinna Loomaaia koostööna korraldatava iga-aastase õpilaste teadustööde riikliku konkursi näol. Lisaks alustas 2007. a septembris ilmumist ajakiri *Akadeemia*, mis avaldab parimaid õpilasuuringusi erinevatel teadusteemadel. Tulevikus võivad need valikud veelgi täieneda, sest *Eesti Energia* ja *Energiakeskuse* koostööna on kavas hakata korraldama energeetikaliste õpilasuuringute konkurssi.

Efektiivseks viisiks ka vähem entusiastlike õpilaste motiveerimisel energeetikatesse süüvima on mitmesuguste *projektide* läbiviimine. See võib hõlmata näiteks plakatite koostamist, MS PowerPointi esitluse ettevalmistamist ja ühist ettekandmist või muudki, sõltuvalt õpetaja loomingulisusest ja konkreetse klassi või õpilase iseloomust. Energiaprojektid võivad piirduda vaid ühe klassi ja ainetunniga, aga olla ka ülekoollised, kaasates enamikku aineõpetajaist. Samuti tasub meie koolide kiire e-arengu tingimustes kaaluda rahvusvaheliste ühisprojektide korraldamist või toimivates projektides osalemist. Piiritaguste koolide kaasamine on efektiivne nii keeleõppe kui silmaringi laiendamise seisukohalt, rääkimata teadmiste vahetamisest osalevate riikide energeetika kohta.

## Õppekäigud ja õppe-ekskursioonid

*Õppekäigud* ja *õppe-ekskursioonid* pakuvad õpilastele rikkalikke võimalusi kogemuslikuks ehk avastusõppeks. Erinevate energiavarade kasutusviise ja nendega kaasnevaid keskkonnamõjusid õpitakse tundma läbi isikliku, vahetu, seesiselt integreeritava kogemuse – selline õppimine on õpilase jaoks tavaõppega võrreldes huvitavam, tähendusrikkam ja pikemas perspektiivis ka tulemuslikum. Siingi leidub õpetajatel mitmekesiseid valikuid, sõltuvalt nii kooli asukohast kui ka energeetikele kulutada soovitatavast ajast. Lihtsaimaks võimaluseks on korraldada, ideaalis koos mitme loodusaine õpetajatega, õppekäik mõnele kohalikule energeetikaobjektile, näiteks katlamajja, elektri- või koostootmisjaama, tuuleparki või ümbertööstlustehasesse. Nähtut-kuuldut tuleks hiljem analüüsida ainetundides, kaasates erinevates loodusainetes omandatud eelteadmisi. Õppekäigust veelgi tõhusam oleks aga 1...2-päevane õppe-ekskursioon, mis võiks hõlmata Kohtla-Nõmme kaevandusmuuseumi, Jõhvi põlevkivimuuseumi, tuhamägesid, Narva elektrijaamu, Tallinna Energiakeskust, aga kindlasti ka mõnd tuuleparki, hüdroelektrijaama, energiavõsaistandust biomassi ümbertööstlustehast või muud alternatiivenergeetikaga seotud rajatist. Iseseisvalt uurides ning õpetaja ja kohalike giidide selgituste toel peaks õpilasel sellise ekskursiooni kaudu kujunema terviklik ülevaade Eesti energeetikast. Hiljem tuleks ka ekskursioonil kogetu üle reflekteerida erinevates ainetundides, tagamaks õpitu parema kinnistumise. Soovitud tulemusena peaks õpilane edaspidi suutma langetada ratsionaalsemalt nii isiklikke energiaga seotud valikuid kui vajadusel kaasa rääkida ka ühiskonna tasandil toimuvates energeetikalistes debattides.

## Võimalused ainetevaheliseks integratsiooniks

Energeetika on oma iseloomult multidistsiplinaarne valdkond. Seega, kõigi eelmainitud õppegevuste puhul avanevad rikkalikud võimalused *ainetevaheliseks integratsiooniks* ja aineõpetajate koostööks. Geograafia (vastavalt üldmaateaduse ja majandusgeograafia) raamidesse mahuksid näiteks vastava ressursi tekke- ja muundumisprotsessid, leiukohad või geografiline jaotumine, transport, tasuvus, kasutamisest tingitud kohalikud või globaalsed keskkonnaprobleemid. Keemiatundides käsitletak biokütuste koostist ja keemilisi omadusi, samuti põletamisel tekkivate jääkainete omadusi ja võimalusi ning tehnoloogiaid nende neutraliseerimiseks. Füüsikakursus selgitaks samal ajal erinevate ressursside kujunemisel ja kasutamisel aset leidvaid energia muundumisi, samuti energiavarade ammutamise ja neist elektri või soojuse tootmisega seonduvat tehnoloogiat, kaasates teadmisi mehhaanika, soojusõpetuse ja elektromagnetismi valdkondadest. Bioloogias leiaksid aga käsitlemist fossiilsete ja biokütuste tekkimine, näiteks energiavõsa kasvutingimused, samuti erinevate ressursside ammutamise ja kasutamisega seonduv mõju nii kohalikule kui globaalsele elukeskkonnale. Kui õppekavas on eraldi valikainena keskkonnaõpetus, siis selle raames saaks sügavuti käsitleda erinevate energiaallikate juurutamisega seotud majanduslikke ja psühholoogilisi faktoreid säästva arengu põhimõtete kontekstis. Lisaks saab energiatemaatikat edukalt lõimida ka ajaloo, vaadeldes mingi energiaressursi kasutamise ajalist dünaamikat ja seda mõjutanud tegureid.

## Teaduskeskuste roll

Olulisteks mitteformaalse energia-alase õppe edendajateks ja energeetikavaldkonna populariseerijateks on teaduskeskused. Eestis leidub neid kaks – Tartus tegutsev *teaduskeskus AHHA* ja Tallinnas resideeruv *Energiakeskus*. Mõlemad on sihtasutused, mille asutajateringi kuuluvad muuhulgas nii linn kui ka kohalik ülikool. Kui loodetavasti lähiaastatel oma maja saav AHHA pakub laiemat loodusteadusliku üldsuunitlusega rändnäitusi ja teadusprogramme, siis endise Tallinna Keskelektrijaama ajaloolise atribuutika keskel tegutsev *Energiakeskus* on koostöös oma ühe asutaja *Eesti Energiaga* järjest rohkem rõhku asetamas just energeetikavaldkonna tutvustamisele. Nii tutvustab näiteks *Energiakeskuse* 2007. a oktoobris avatud uus interaktiivne püsinäitus *Tuleviku linn* erinevas vanuses õpilastele just moodsaid tehnoloogiaid energia säästmisel, pakkudes keskust külastavatele klassigruppidele mitmekesist katsetmist ja avastamist. Edaspidi on *Energiakeskusel* ja *Eesti Energiat* kavas taastuvenergeetika-alast tutvustustööd veelgi laiendada. Lisaks kahele statsionaarsele teaduskeskusele tegutseb meil ka Eesti Füüsika Seltsi mobiilne *Teadusbuss*, pakkudes Eesti koolides köitvaid teadusetendusi, mis muuhulgas hõlmavad ka energiateemasid.

## Taastuvenergeetika riiklikus õppekavas

Eestis juba aastast 2002 kehtivas põhikooli ja gümnaasiumi riiklikus õppekavas leiame taastuvenergeetika haakuvad teemad ootuspäraselt loodusainete ainekavadest.

Teemakäsitus saab alguse loodusõpetuses, mille ühe õppe-eesmärgina õpilane *omandab teadmisi energia saamisest, muundumisest ja kasutamisest*. Esmatutvus elektriga tehakse juba 1...3. klassis, aga energiavaradega tutvutakse põhjalikumalt teises kooliastmes (4...6), mil ühe õppegevusena esitletakse *Taastuvad ja taastumatud loodusvarad*, kaasates ka: *Päikeseenergia: tuule, vee ja kütuste energia*. Samuti suunatakse õpetajaid tutvustama jätkusuutliku arengu üldpõhimõtteid ning keskkonnaprobleeme riigis ja kodukohas.

Seitsmendast klassist algav geograafia omab samuti tähtsat rolli taastuvenergeetika tutvustamisel. Põhikooli õppesisu loendis leiame Eesti majanduse teema alustuseks käesoleva artikli seisukohalt olulise punkti: *Alternatiivenergia kasutamise võimalused*. Gümnaasiumiastmes naasetakse energiateema juurde laiemalt ja süvitsi: üldmaateaduse kursuse raames haakub sellega õppesisu punkt *Maa*

*energiasüsteem, sisaldades järgmisi aktuaalseid alateemasid: Maakera energiabilanss: päikeseenergia, Maa siseenergia, gravitatsioonenergia; energia liigid ja nende avaldumine looduses; inimeste energiatarve. Lisaks puudutatakse ressursse ja jätkusuutlikku arengut. Majandusgeograafia kursuse õppesisust leiame aga eraldi punktina energiamajanduse: Kaasaegse energiamajanduse struktuur. Alternatiivenergia kasutusvõimalused erinevates loodusvööndites, sellega kaasnevad keskkonnaprobleemid. Erinevate kooliastmete loodusgeograafia õppekavast leiame veel ka üldisemaid teemasid, mida oskuslik õpetaja saab lõimida taastuveneergetika valdkonnaga: veestik (hüdroenergia), atmosfääri tsirkulatsioon (tuuled), loodusvööndid (biomass), tektoonika (geotermaalenergia) jne. Seega on alust eeldada, et just geograafia võiks olla viljakaim aine taastuveneergetika tutvustamiseks.*

Osaliselt haakub käsitletava teemaga ka bioloogia õppekava. Põhikooli õppesisust leiame punkti: *Taimede tähtsus inimese elus* – siin sobib selgitada ka biomassi kasutamist energiaallikana. Samuti pakub energia-alternatiivide tutvustamise võimalusi teema *Organismide kooslus. Inimtegevuse mõju ökosüsteemidele. Biosfäär. Bioloogilise mitmekesisuse säilitamine. Looduskaitse Eestis. Globaalprobleemid. Säästev areng. Keskkonna ja säästva arengu temaatika* juurde naastakse jälle gümnaasiumi lõpukursusel, kus taas on vaatluse all organismide koosseisustamine, sealhulgas ökosüsteemid ja biosfäär, bioloogiline mitmekesisus, keskkonnakaitse regionaal- ja globaal-probleemid, looduskaitse ja keskkonnapoliitika. (Taastuv)energeetika teemadega sobib siin tegeleda, vaadeldes erinevate energiatootmisviiside mõju elukeskkonnale.

Põhikooli keemia ainesisust haakuvad alternatiivenergeetikaga kaks teemat: *Süsinikuühendid kiitusena ning Keemia ja elukeskkond. Elukeskkonna reostusallikad.* Nende kaudu õpitakse tundma keemilise saaste allikaid, mõistetakse kasvuhooneefekti ja happesademetekkehhanismi. Siin on õpetajal võimalus käsitleda võrdlevalt fossiilsete ja biokütuste kasutamise keskkonnamõju. Gümnaasiumiosas korraldatakse põhikooli programmi laiendatult ja süvendatult. Siin pakub võimalusi erinevate kütuste omaduste käsitlemiseks näiteks punkt *Orgaaniliste ühendite oksüdeerumine*, samuti alkaanide teema. Lisaks on ainekavas enamiku aineklasside juures ära märgitud ka nende keskkonnamõju. Ühe õpitulemusena gümnaasiumi lõpetaja ideaalis *mõistab ja oskab selgitada orgaaniliste ainete osa eluslooduses, tööstuses ja olmes.* On ilmne, et see eeldab ka nii fossiilsete kui biokütuste tundmaõppimist.

Ka füüsika ainekava haakub mitmes punktis alternatiivsete energiaallikate teemaga. Juba üldsätetes rõhutatakse, et *oluline on füüsika seostamine tehnika ja tehnoloogiaga, sh keskkonnatehnoloogiaga*, lisades, et: *Siinkohal on sobiv käsitleda füüsika osa globaalprobleemidele lahenduste leidmisel. [...] Inimkonna eksisteerimiseks on oluline, et uute tehnoloogiate arendamisel ja juurutamisel suudaksid kaasa rääkida võimalikult paljud inimesed.* Rõhutatud on koostööd teiste loodusainetega, tuues ühe võimalusena välja projektõppe. Põhikooli ühe õpitulemusena peaks õpilane mehhaanika, soojus- ja elektriõpetuse kursuste läbimise järel teadma *keskkonna- ja elektrisäästu vajadust*. Samu valdkondi (muuhulgas elektri ja magnetismi temaatikat) käsitletakse süvendatult ja laiendatult gümnaasiumis, mis peaks põhikooli vastavat õpitulemust veelgi edasi arendama. Võib öelda, et õppekavale tuginedes on füüsikaõpetajal võimalik sõltuvalt isiklikust huvist ja teadmispagasist alternatiivenergia temaatikat kaasata mitmete teemavaldkondade käsitusse, kuid ka seda sisuliselt ignoreerida. Ette rutates võib öelda, et praegu kasutusel olevad füüsikaõpikud ei toeta õppekava üldsätete realiseerimist, jättes vastavad ülesanded õpetaja õlule.

On kahetsusväärne, et keskkonna ja energeetikaga seonduvaid probleeme eiratakse täielikult ajaloo õppekavas. Viimase koostajad on unustanud olulise rolli, mida inimajaloos on mänginud võitlus ressursside pärast ja keskkonnaseisundi muutused. Selle ajalooteaduse “kulisside” taha jääva läbiva liiniga võib huviline tutvuda näiteks C. Pontingi põhjaliku teose “Maaailma roheline ajalugu” vahendusel. Ka uusimat ajalugu mõjutab järjest enam ressursside ammendumine ja vajadus hakata elama vastavuses säästva arengu põhimõtetega. Loodetavasti mõistavad uue õppekava autorid vajadust ajalookäsitlusse kaasata ka keskkonnaga seonduv temaatika. Vastavaid soovitusi pakub oma artiklis ka Urmas Tokko [18].

Lisaks eelkäsitletud õppeainetele toetab taastuenergeetika tundmaõppimist ja hilisemat energiadebatis kaasaraadkimist kaudselt uhiskonnaõpetus riigivalitsemise pühimõtete, seadusandluse, kodanikuühiskonna printsipide, uhiskonna ja majanduse toimetehhanismide ning infohankimise aluste tutvustamisega. Ka töö- ja tehnoloogiaõpetuse ainekava võimaldab käsitleda alternatiivenergeetikaga seotud tehnoloogilisi lahendusi: *Tehnika läbi aegade. [...] Vesiratas ja tuuleveski. [...] Soojuse muundumine tööks aurumasinas. [...] Elektrienergia kui kaasaegse tehnika alus. Elektrigeneraatorid ja elektrimootorid. Sisepõlemismootorid – otto-, diisel- ja vankelmootorid. Pooljuhid ja elektronlambid. Aatomienergia plussid ja miinused* [20].

Läbiva teemana on kehtivas õppekavas esile tõstetud *keskkond ja säästev areng*, mille omandamine peaks toimuma peamiselt erinevate loodusainete, aga ka ainetevaheliste projektide ja klassiväliste ürituste kaudu. Õppe-eesmärgid ja kujundatavad pädevused dubleerivad siin valdavalt juba eespool käsitletud ainekavu. Üldalustes rõhutatakse: *Teema õpetamisega seatakse eesmärk kujundada õpilaste keskkonnateadlikkust, kasvatada keskkonnahoidlikku tarbijat. Kujundatakse pädevusi elada pidevalt muutuv keskkonnas nii, et ka järgmistel põlvkondadel säilib võimalus kasutada ressursse.* On selge, et kõik see eeldab energiakasutuse temaatika küllaldast käsitlemist läbi erinevate õppeainete.

## Taastuenergeetika loodusainete õpikutes

Käesoleval ajal Eesti koolides kasutatavad õpikud on kinnitatud Haridus- ja teadusministeeriumi poolt, tunnistades need vastavateks kehtivale, 2002. a õppekavale. Seega peaksid taastuenergeetika valdkonda kohustuslikus korras ja laialdaselt käsitlema eeskätt loodusõpetuse ja geograafia õpikud. Nii 9. klassi kui gümnaasiumi orgaanilise keemia kursusel seostub taastuenergeetikaga eeskätt biogaas – metaan. Füüsika ainekavas otseselt taastuenergeetikat ei puudutata, ent kuna sellega haakuvad mitmed üldisemad aine-eesmärgid, siis võiks eeldada, et teatavat käsitlust peaks taastuenergeetika leidma ka füüsikaõpikutes.

## Loodusõpetus

Esimest korda tutvustatakse alternatiivseid energiaallikaid õpilasele süstemaatilisel viisil 5. klassi loodusõpetuses. Nii on juba eelmise õppekava alusel koostatud õpikus [1] kolmel leheküljel eraldi vaadeldud päikese-, tuule-, tuuma- ning tõusu ja mõõna energiat, samuti kuumaveeallikaid ja nende kasutusvõimalusi. Ühtegi neist pole samas seostatud Eestiga. Väiksemas mahus on taastuvatest energiavaradest juttu ka uuele õppekavale vastava Koolibri kirjastuse õpiku I osas [17]. Alapeatükis *Päikeseenergia – tuule- ja vee-energia ning kütuste energia* selgitatakse õpilastele tuule-, vee- ja kütuste energia pärinemist päikeseenergiast, samuti lühidalt ja illustreeritult tuulegeneraatori ja hüdroelektrijaama tööpühimõtet. Mainitud on ka tuuleenergeetika praegust arendamist Eestis. Õpilasi ärgitatakse valmistama vesiratta mudelit. Järgmises, Eesti loodusvarasid tutvustavas alapeatükis täiendatakse, et Eestis ei kasutata küll Maa siseenergiat, hoovuste ega tõusu-mõõna energiat, aga siin-seal võib kohata esimesi tuulegeneraatoreid ja väikesi hüdroelektrijaamu. Muudetud lähenemine on õigustatud, kuna 5. klassile ei tasu pakkuda liiga detailseid elektrijaamade kirjeldusi.

Vana õppekava kohases 6. klassi õpikus [16] võib samuti kohata viiteid taastuenergiadele, seda eeskätt peatükis *Taastuvad ja taastumatud loodusvarad*. Lühidalt selgitatakse, et loodusvarad on ka liikuv õhk (tuul) ja vooluvesi – mõlemate abil saab toota elektrienergiat. Aastatel 2004...05 kahasse S. Kaljulaga kirjutatud uuele õppekavale vastavates õpikutes H. Relve enam taastuenergeetika teemat ei puuduta.

7. klassi loodusõpetus on olemuselt sissejuhatus järgmisel õppeaastal algavatesse keemia ja füüsika kursustesse. Ka siin leidub mitmekesiseid võimalusi teemade seostamiseks taastuenergeetikaga. Koolibri kirjastuse õpikus [11] esitatakse *kartulijõnjaama* kui alternatiivset võimalust nõrga elektrivoolu saamiseks. Lisaks peatutakse vooluallikaid tutvustades päikeseptareidel ja nende

kasutusel kosmoseaparaatides ja taskuarvutites. Peatükist *Energia* leiame aga hüdroelektrijaama foto ja lühiselgituse.

## Geograafia põhikooliõpikud

Geograafia õpikutes leiavad taastuvenergeetika küsimused ootuspäraselt kõige põhjalikumalt kajastamist. Loodusgeograafia kursuste raames mainitakse neid seoses loodusvarade kirjeldamisega, majandusgeograafia kursustel tutvustatakse aga energeetika (ala)peatüki raames.

Eelmisele õppekavale vastanud 9. klassi põhikooliõpik [19] puudutab taastuvenergiat energiamajanduse alapeatükis. Alternatiivsetele energiavaradele pööratakse siin vaid põgusalt tähelepanu: *Suured taastuvad energiavarad peituvad Maa loodusprotsessides. Need on päikese-, tuule-, vee-, biomassi-, tuumaenergia jmt. Tänapäeval leiavad praktilist kasutamist eelkõige vee- ja tuumaenergia. Soojusenergeetika tutvustuses mainitakse põgusalt vaid puiduhaket. Siiski nendivad autorid: Lähiaastatel on Eestis vastukaaluks kallile ja keskkonnoahtlikule põlevkivienergeetikale teadvustumas vajadus nn alternatiivenergia (mittetraditsioonilise energia) järele. Arvutuste kohaselt saaks umbes 10% kohalikust energiatarbest rahuldada tuuleenergia abil, lootustandvad on ka mitmed bioenergia liigid (energiavõsa, biogaas).*

Esimeses uuele õppekavale kohaldatud põhikooliõpikus [9] mainitakse Eesti energiavaradest vaid põlevkivi ja turvast. Energeetikat on tutvustatud vaid kahel leheküljel, täielikult ignoreerides alternatiivseid energiavarasid: *Eesti kütusevarud (põlevkivi, turvas) on suhteliselt väikesed.* Siiski on ka ära toodud aastas põletatavate küttepuude kogus. Elektrienergia teema juures analüüsitakse põgusalt Eesti nappi hüdroenergia-potentsiaali, leheküljelt 104 leiame ettevaatliku lause: "Võib-olla on tulevikku tuulegeneraatoritel?" Lühidalt vaadeldakse ka Euroopa energeetikat, mainides ühe lausega ära ka hüdroenergia kasutamise Skandinaavias, Alpide ja Püreneeide piirkonnas, päikese-elektrijaamad Lõuna-Euroopas ning eksitava asjaolu, et *Taanis annavad paar protsenti kogu toodetavast elektrienergiast tuuleturbiinid.*

Koolibri kirjastuselt 2003. a ilmunud õpik „Geograafia põhikoolile. Eesti ja Euroopa“ [13] pakub 38 leheküljel tasemel ülevaate Eesti majandusgeograafiast, mille juhatab sisse suur tuulepargi foto. Energiamaajandust käsitletakse neljal lehel, pöörates võrdväärset rõhku nii taastumatutele kui taastuvatele energiavaradele. Viimastena mainitakse ära päikese-, tuule-, vee- ja biomassi energia. Rõhutatakse vajadust tõsta kodumaise energia osatähtsust ning tutvustatakse positiivseid arenguid tuule-, hüdro- ja biomassi energia vallas, sealhulgas riigipoolset stimuleerimist. 2010. aastaks seatud eesmärgi täitmisel asetatakse põhilootused tuule- ja bioenergiale. Lisalugemise rubriigis ühel leheküljel tutvustatakse põhjalikumalt Eesti tuuleenergeetika tollast hetkeseisu ja tulevikukavasid. Euroopa riikide geograafiat tutvustavas osas leidub samuti mitmeid fakte taastuvenergia kasutamise kohta.

Uusima Avita põhikooli majandusgeograafia õpiku [10] energiamajanduse peatükis on võrreldes eelkäsitluga rõhuasetusi veidi muudetud. Põlevkivienergeetika, turba- ja puidukütte tutvustamise kõrval leiame ka eraldi alapunkti: *Mis saab rohelisest energiast?* Autor tõdeb, et Eestis on hakatud palju rääkima rohelisest (taastuvast) energiast, mille all mõeldakse lisaks kohalikule puidule ka vee- ja tuuleenergiat. Tema hinnangul on Eesti vee- ja tuuleenergia varud küllaltki kasinad ning *vee- ja tuuleenergial on Eestis paratamatult pigem sümbolne tähendus.* Samas tuleb siiski juttu sõjaeelsete väikehüdroelektrijaamade taastamisest ja ära märgitakse ka Lääne-Eestisse püstitatud esimesed tuulegeneraatorid. Viidatud on katselisele prügilagaasi tootmisele Pääskülas. Euroopa majanduse ülevaates mainitakse põgusalt hüdroenergia kasutust Skandinaavias, Šveitsis ja Austrias, geotermaalenergiat Islandil ja tuuleenergiat Taanis.

## Geograafia gümnaasiumiõpikud

1995. a riiklikule õppekavale vastanud gümnaasiumi rahvastiku- ja majandusgeograafia õpik "Geograafia 10. klassile" [14] sisaldab peatükki *Maailma energiamajandus*. Autorid liigitavad energiavarad muundumiste arvu järgi esmasteks, teisesteks ja kolmandasteks, samuti traditsioonilisteks ja alternatiivseteks. Viimastele on pööratud äärmiselt vähe tähelepanu: neid kirjeldab vaid üks lõik, kus nenditakse, et päikeseenergiat sobib kasutada vaid teatud piirkondades ja sellega liialdamine paneb Maa loodusprotsessid seisma, tuuleenergiat on vähe ja see on kallis, samas kui tugevat laienemisperspektiivi omab vaid biomass nt energiavõsa kujul. Ühtlasi ennustavad autorid, et nafta ja maagaasi ammendumine toob kaasa muuhulgas *energia olulise kallinemise ja senisest palju suurema keskkonna saastumise*.

Ülevaate maailma energiavaradest ja nende rakendamise võimalustest pakub ka Sulev Mäeltsemehe ja Avita 2003. a välja antud gümnaasiumiõpik. Energeetika peatükis leidub lisaks üldtutvustusele ja traditsiooniliste energiaallikate käsitlemisele ka arvestatav ülevaade peamistest alternatiivenergia liikidest: päikesekollektorid ja -patareid, tuuleenergia, tõusu-mööna, lainete ja geotermaalenergia, biomass. Kõigi puhul on välja toodud nende kasutamise plussid ja miinused. Samas tõuseb esile autori ettevaatlik-skeptiline üldhoiak: *Alternatiivsed energiavarad on sellised, mille kasutamine on küll põhimõtteliselt võimalik, kuid selleks puuduvad tänapäeval veel vastuvõetavad tootmistehnoloogiad või on need väga kallid. Ei ole ju mõtet toota energiat, mille tootmiskulud ületavad energia turuhinna* [12].

Samal aastal ilmunud konkureerivas õpikus Eesti Loodusfotolt [2] hõlmab energiamajanduse teema samuti eraldi peatüki. Kui Mäeltsemees keskendub traditsioonilisele energeetikale, siis selle õpiku autorid rõhutavad vajadust alternatiivide järele juba peatüki alguses. Alternatiivseid ehk *rohelist* energiaallikaid käsitletakse koguni neljal leheküljel, tutvustades päikese-, tuule-, biomassi-, vee- ja geotermaalenergiat. Samuti leiavad peatükis äramärkimist Maa pöörlemise ehk loodete energia ja võimalike tuleviku energiaallikatena ka gravitatsiooni- ja termotuumaenergia. Eelnevaga võrreldes paistab see õpik silma suurte ja kvaliteetsete illustratsioonidega.

Tartu Ülikooli geograafia instituudi õppejõudude koostööna valminud Eesti Loodusfoto õpikus [3] ei pühendata taastuvenergiale küll eraldi peatükki, kuid seda valdkonda puudutatakse läbivalt, rõhutades selle olulisust. Ühtlasi pakub tutvustatav Maa energiasüsteemi ja kultuurökosüsteemi kontseptsioon hea pinnase energeetikateema ankurdamiseks. Muuhulgas tutvustatakse õpikus hüdroelektrijaama ja veehoidlat suure avatud süsteemi näidisena ning mainitakse kuuma vee kasutamist energiaallikana Islandil, Uus-Meremaal ja mujal. Autorid toonitavad, et *Eesti jaoks on üks tõhusamaid viise piirata kasvuhoonegaaside emissiooni põlevkivienergeetika osatähtsuse vähendamine ja alternatiivsete, sealhulgas taastuvate energiaallikate järjest suurem kasutuselevõtt*. Süsinikuringe kirjelduse juures rõhutatakse Eesti suurt CO<sub>2</sub>-emissiooni, hoiatades lugejat Euroopa Liidu saastetrahvidest tuleneva elektrienergia mitmekordse hinnatõusu eest ja nentides taas: *On ülim aeg pöörata rohkem tähelepanu alternatiivsetele energiaallikatele, mis võiksid põlevkivi asendada. Tuuleenergia ja biomassi põletamisest saadav energia on tõenäolised võimalused sellel teel*. Eelmisega konkureerivas Avita gümnaasiumi üldmaateaduse õpikus [4] jääb energiateemade käsitus märksa tagasihoidlikumaks. See kehtib ka taastuvenergia kohta, mida puudutatakse põhiliselt V peatükis *Maa energiasüsteem*. Endogeenseid protsesse kirjeldades mainitakse termaalvett kui soojusallikat Islandil. Samas lisatakse: *Kütuste põletamisest, vee-energiast, tuulejõust jt allikatest saadavat energiat saab inimene hästi kontrollida ja kasutada. [...] Peale põlevkivi, söe, nafta, metsa, vee jt traditsiooniliste energiaallikate võib Eestis perspektiivseimaks pidada veel tuule- ja tuumaenergia kasutamist*.

Seega võib kokkuvõttes tõdeda, et kui põhikooli geograafia pakub meie õpilastele vaid põgusa kokkupuute alternatiivenergeetikaga, siis gümnaasiumisse jõudnud õpilane saab sellest valdkonnast juba märgatavalt põhjalikuma ja süsteemsema ülevaate. Samas jääb üle loota, et viimaste aastate jõulised edusammud tuuleenergeetika ja biokütuste vallas leiavad kajastamist ka tulevastes geograafiaõpikutes.

## Teised aineõpikud

Bioloogiaõpikute teemakäsitus keskendub fossiilsetest kütustest tingitud keskkonnaprobleemidele ning säästva arengu ja keskkonnakaitse põhimõtete tutvustamisele. Õpikutes ei käsitleta taastuvenergeetika valdkonda omaette. Samas tasuks bioloogia raames rohkem tähelepanu pöörata biokütuste tutvustamisele.

Füüsika puhul on aga keskkonna ja säästva arengu temaatika õpikutes täiesti tahaplaanile jäetud, nagu ka paralleelide otsimine teiste loodusainetega. Jääb mulje, nagu ei hindaks meie füüsikaõpikute autorid ainetevahelist integratsiooni, pidades *puhast füüsikat* väärtuseks iseeneses, mida ei sobi „lahjendada” vähemal määral teaduslikke distsipliine kaasates. Kahjuks laieneb see üldprintsüüp ka füüsika rakendusalaadele, nagu näiteks alternatiivsed energia tootmise tehnoloogiad. Võib öelda, et vaadeldud füüsikaõpikutes polnud taastuvenergeetikat sisuliselt puudutatud. Ainsana leiab energiavaradest käsitlemist füüsika „pärusmaale“ mahtuv tuumaenergia. Erandina saab välja tuua vaid soojusõpetust käsitlevas vastses 9. klassi õpikus [15] leiduva päikesekollektori tutvustuse. Selles kontekstis tasub eriti esile tõsta Koolibri ja Venda Paju gümnaasiumi füüsikaõpikuid täiendavat infokogumikku „Pilk teaduse- ja tehnikamaailma“ (2005). Paju tutvustab mitmesuguseid moodsaid tehnikasaavutusi, mis kaasavad alternatiivseid energiaallikaid: päikesepatareid, soojussalvestid, kütuselemendid jm. Peatükk 5 on terveniisti pühendatud alternatiivsete energiaallikate ja -tehnoloogiate tutvustamisele. Õpilastele pakutakse huvitav ülevaade mitmesugustest perspektiivikatest võimalustest energia tootmiseks: kivisöe gaasistamine, moderniseeritud tuumajaamad, Maa sisesoojuse energia, päikese-soojuselektriiaam ja päikese-konveksioonielektriiaam, hüdroenergia, tuuleenergia, tõusu ja mõõna energia, lainete energia ja kütuselement.

Vaadeldud keemiaõpikud ei paista samuti silma rikkalike taastuvenergeetika-alaste teadmiste pakkujatena, sisaldades siiski orgaanilise keemia osas lühitekste metaani kui biogaasi põhikomponendi kohta. Koolibri välja antud 9. klassi õpik [6] selgitab, et biogaasis on 60...70% metaani ning seda tekib sõnniku, komposti, muda ja prügilagaasi lagunemisel anaeroobsetes tingimustes. Märgitakse ka, et biomassi kääritamiseks ja biogaasi kogumiseks on kasutusele võetud spetsiaalsed tankid. Ühe lausega mainib metaani teema juures biogaasi ka konkureeriv õpik [8]. Selles loetletakse biogaasi allikatena toidujäätmeid, reovett ja läga. Uusimas gümnaasiumi orgaanilise keemia õpikus [7] on metaani käsitletud veidi põhjalikumalt, lisades ka, et Eestis töötab kaks suurt biogaasi tanki. Täiendava energiareservina ja ühtlasi võimaliku kliimamuutuse mõjurina leiavad käsitlemist ka ookeanipõhjas lasuvad metaani hüdraadid.

## Taastuvenergeetika temaatika riiklikel lõpueksamitel

Põhikooli lõpueksamid ja gümnaasiumi riigieksamid kontrollivad ühelt poolt riikliku õppekava täitmist, teisalt aga ei tohiks liialt lahkneka ka õpikutes tutvustatavast ainesisust. Samas on Eesti *curriculum*-tüüpi, peamiselt märksõnalise õppekava juures ja oludes, kus lõpueksamate tulemused on kasutusel koolide taseme põhiindikaatorina, just lõpueksamid õpetajatele üheks olulisimaks orientiiriks õppesisu rõhuasetuste valikul. Arvestades riigieksamate tihedat seost õppekava ja aineõpikutega, tasub eksamitööde alternatiivenergeetika-teemalisi ülesandeidki otsida eeskätt loodusainete valdkonnast.

Et geograafia ainesisu hõlmab energeetika valdkonda suhteliselt kõige enam, võiks eeldada, et just selle aine riiklikud eksamid sisaldavad ka kõige arvukamalt taastuvenergeetika-teemalisi ülesandeid. Samas tuleb Riikliku Eksami- ja Kvalifikatsioonikeskuse kodulehel [22] eksamitöödega tutvudes nentida, et kolme viimase aasta põhikooli lõpueksameil ei ole taastuvenergeetikale praktiliselt tähelepanu pööratudki. Samas on tugevat rõhku pandud fossiilkütustele ja nende keskkonnamõjule. 2005. a gümnaasiumi riigieksamitööst leiame eraldi küsimused tuumaenergia ja kivisöe kohta, samuti maailma energiavarade osatähtsuste diagrammi, ent alternatiivseid allikaid sisuliselt ei puudutagi.



Aastal 2006 tuli õpilasel selgitada Kyoto lepet ja ökoloogilist jalajälge, aga ka teha kaardi põhjal järeldus, et Šotimaal, kus on palju hüdroelektrijaamu, tasub edendada alumiiniumitööstust. 2007. a eksamitöös leidis nafta ja tuumanergia kõrval ka ülesanne, kus erinevat tüüpi elektrijaamade, sh hüdroelektrijaamade osakaalu näitav diagramm tuli ühendada riiginimega. Kokkuvõttes nähtub, et 3 viimase aasta geograafia põhikoolieksamites ei ole alternatiivenergiat üldse puudutatud, pisut parem on olukord siiski gümnaasiumi lõpueksamitega.

Teiseks õppeaineks, mille raames tutvustatakse keskkonna ja säästva arengu temaatikat küllaltki põhjalikult, on bioloogia. Samas ei ole siingi põhikooli tasandil energia-alternatiive otseselt puudutatud. 2005. a eksamitööst leiame vaid küsimused, kuidas saaks vähendada happevihmade esinemist ja toimida keskkonnasõbralikul viisil. 2006. a bioloogia riigieksam puudutas fossiilkütuste energeetika kahjulikke mõjusid, samas alternatiividele vihjamata. Seevastu 2007. a eksamitöös taheti muuhulgas teada *roheline elektri* osakaalu kasvu mõju eestlaste ökoloogilisele jalajäljele. Üldiselt aga on alternatiivenergeetika teemavaldkond bioloogiaeksamitel marginaalne.

Keemia riigieksamitelt võiks oodata eeskätt küsimusi kütuste kohta. 2005. a põhikooli eksamitöös tuli märkida üks metaani kasutusala. Gümnaasiumi lõpueksami sooritajatel tuli 2006. a lahendada ülesanne biodiisli ümberestendamise teel tootmise kohta rapsiõlist. Ülejäänud eksamitööd aastatel 2005...2007 taastuvenergeetika teemasid ei sisaldanud. Seega ka keemia eksamitöödes on taastuvenergeetika harvaks eksikülaliseks.

Füüsika lõpu- ja riigieksamitel puudusid aastatel 2005...2007 keskkonnatemaatikat käsitlevad ülesanded üldse, rääkimata alternatiivenergeetikaga seonduvatest. Ülesanded olid tugevalt teoreetilise kallakuga ja neis puudus taotlus ainetevaheliseks integratsiooniks. See on kahetsusväärne, arvestades õppekava rõhuasetusi. Ühiskonnaõpetuse riigieksamil on nii 2006. kui ka 2007. a abiturientidele pakutud võimalus kirjutada 1...2 lk pikk arutlus keskkonnaga seotud teemal, soovi korral puudutades ka energeetika valdkonda: *Roheline mõtteviis tarbimisühiskonnas* (2007) ja *Kuidas tagada ühiskonna jätkusuutlikkus?* (2006). Ka emakeele gümnaasiumi lõpukirjand pakub sageli võimalust kirjutada keskkonnaga seotud teemadel. Aastal 2007 pakuti välja: *"Lõbusalt saab inimkond oksa, millel ta istub."* (Mati Unt) ja 2006: *Roheline mõtteviis poolt ja vastu*.

Kokkuvõttes valdab ülesannetes oodatult fossiilkütuste ja neist lähtuva keskkonnamõju temaatika, alternatiivseid võimalusi on eriti just põhikoolieksameil puudutatud vähe ja ebajärjekindlalt ja üldsegi mitte näiteks Eestiski aktuaalseid tuule- ja päikeseenergiat. Selline olukord ei motiveeri õpetajaid vastavale temaatikale õppetöös erilist rõhku pöörama.

## Kokkuvõte

Edukas taastuvenergeetika arendamisel on üheks inimkonna saatuse võtmeküsimuseks 21. sajandil. Sarnaselt seisavad ka Eesti ees juba lähikümnendil tõsised väljakutsed seoses põlevkivienergia järsu kallinemise ja vajadusega leida sellele alternatiive. Selleks, et meie noored suudaksid iseseisvasse ellu astudes ühiskondlikus energiadebatis kaasa rääkida, on oluline neile pakkuda heatasemelist energeetika-haridust. Taastuvaid energiaallikaid on võimalik tutvustada väga erinevate meetoditega: traditsiooniline klassitöö, referaadid ja uurimistööd, projektöpe, õpperetked ja -ekskursioonid. Sealjuures pakub õpetajatele valikute langetamisel raamistikku juba aastast 2002 kehtiv riiklik õppekava. Lisaks on õpetajatele abiks õpikud, mis teemakäsitluse sügavuselt ja tasemelt küll erinevad, ent on siiski taastuvenergeetika valdkonna tutvustamisel aasta aastalt täiustunud. Olulisimateks taastuvate energiavarade tutvustajaks on geograafia ja loodusõpetuse õpikud, eriti tagasihoidlik on aga olukord füüsikaõpikute puhul. Oluliseks indikaatoriks taastuvenergia-alaste teadmiste omandamise kohta võiksid olla vastavate õppeainete riigieksamid, kahjuks on aga neis viimasel 3 aastal leidunud küllaltki vähe taastuvenergia-teemalisi ülesandeid.

## Kirjandus

1. Aher, S.; Liiva, A.; Lepasaar, K. (1996) Loodusõpetus 5. klassile. Avita.
2. Ainsaar, M.; Müristaja, H.; Nõmmik, A.; Raagmaa, G.; Roosaare, J.; Roosve, R.; Rootsmäe, V. ja Saar, E. (2003) Raagmaa, G. (toim). Maailma ühiskonnageograafia gümnaasiumile. Eesti Loodusfoto.
3. Hang, T.; Jaagus, J.; Järvet, A.; Kanal, A.; Kirs, J.; Mander, Ü.; Oja, T.; Puura, I. ja Roosaare, J. (2004) Liiber, Ü. (toim). Üldmaateadus gümnaasiumile. Eesti Loodusfoto.
4. Harak, M.; Jõgi, J.; Kont, A.; Pihlak, L.-K.; Punning, J.-M.; Ratas, U.; Rivas, R. (2003) Üldmaateadus gümnaasiumile. Avita.
5. Jõgi, J.; Pihlak, L.-K.; Tõnisson, A. (1998). Maakera loodus- ja inimgeograafia VIII klassile. Koolibri.
6. Karelson, M.; Lukason, A.; Tõldsepp, A. (2001) Keemia IX klassile. Anorgaanilised ja orgaanilised ained. Koolibri.
7. Karelson, M.; Tõldsepp, A. (2007) Orgaaniline keemia gümnaasiumile. Koolibri.
8. Karik, H. (2001) Keemia IX klassile. Koolibri.
9. Kont, A.; Rummo, T. (1999) Geograafia 9. klassile. Maa ja ilm. Avita.
10. Kukk, K. (2004) Geograafia põhikoolile, 5. osa. Eesti ja Euroopa: rahvastik ja majandus. Euroopa riigid. Avita.
11. Kuurme, M. (2001) Loodusõpetus 7. klassile. Avita.
12. Mäeltsemees, S. (2003) Maailma ühiskonnageograafia gümnaasiumile 2. osa. Avita.
13. Pihlak, L.-K.; Tõnisson, A. (2005) Geograafia põhikoolile. Eesti ja Euroopa. Koolibri.
14. Pragi, U.; Liiber, Ü.; Uiho, M. (1997) Geograafia 10. klassile. Avita.
15. Pärtel, E.; Lõhmus, J. (2007) Soojusõpetus. Aatom ja Universum. IX klassile. Koolibri.
16. Relve, H. (1999) Loodusõpetus VI klassile, 1. osa. Koolibri.
17. Saar, A.; Karik, H.; Sirel, K.; Kaljula, S. (2003) Loodusõpetus V klassile, 1. osa. Koolibri.
18. Tokko, U. (2005) Keskkonnaajalugu ühendab. Kogumikus: Loodusainete õpetamisest koolis, I osa (toim. I. Henno), lk 141-144. Riiklik Eksami- ja Kvalifikatsioonikeskus, kirjastus Argo.
19. Tõnisson, A.; Pihel, P. (1999) Eesti ja Euroopa loodus- ja inimgeograafia 9. klassile. Koolibri.
20. Põhikooli ja gümnaasiumi riiklik õppekava. Elektrooniline Riigi Teataja, URL: <https://www.riigiteataja.ee/ert/act.jsp?id=12841613> (29.10.2007)
21. Euroopa Liidu säästva arengu strateegia rakendamine Eestis. (2007) *Eesti sisend Euroopa Komisjoni eduaruandele Euroopa Liidu säästva arengu strateegia rakendamisest*. Tallinn. URL: <http://www.riigikantselei.ee/failid/> (29.10.2007)
22. Riiklik Eksami- ja Kvalifikatsioonikeskus. Eksamid. (2007) URL: <http://www.ekk.edu.ee/riigieksamid/index.html> (29.10.2007)

# Torma biogaasijaam

Arno Raadom

Eesti Maaülikooli tehnikainstituut

Ülevaateartiklis biogaasi kasutamise võimalusest Torma alevikus on gaasi võimalikul tootmisel aluseks võetud vedelsõnniku ja lisasubstraadide kasutamine. Biogaasi kasutamine toimub keskküttevõrgus asula soojatarbe katmiseks. Projekti majandusarvutused on teostatud kinnitatud soojahinda arvestades.

Taastuvate ja alternatiivsete energiaallikate, sh biomassi tootmise toetamine on struktuuri- ja ühtekuuluvusfondide oluline prioriteet, nagu märgitakse Euroopa Komisjoni ettepanekus ühenduse ühtekuuluvuspoliitika strateegiliste suuniste kohta. Kõnealused fondid võivad toetada põllumajandustootjate ümberõpet, seadmete hankimist biomassi tootjatele, investeeringuid biokütuste ja muude materjalide tootmisrajatistesse ning elektri- ja kaugkütetootjate ümberlülitumist biomassile [1].

Elamu- ja tööstushoonete soojusvarustuses on puidust biomassi kasutamise tehnoloogia enim levinud. Biomassi kasutamisel on tugev traditsioon ning just selles sektoris kasutatakse enamus biomassist. Kõigest hoolimata suureneb biomassi kasutamine teiste küttematerjalidega võrreldes kõige aeglasemalt, mille üks peamisi põhjusi on biomassi saagise jaotumises. Kuna tavaliselt ei ole suuri farme ega teisi biomassi tootvaid asutusi rajatud asulate lähedasse piirkonda, kujuneb selle transport kulukaks, vähendades oluliselt selle tasuvust. Investeeringute suurust arvestades ei taha enamik tootjaist sellega riskida ja lihtsam on kasutada juba väljakujunenud ja kindaid meetodeid. Kuna väikeasulate hinnatundlikke tarbijaid mõjutab pidev kütteõli hinnatõus, siis eraldub üha enam tarbijaid kaugküttevõrgust. Tänu sellele pole võrku võimalik kasutuses hoida ning seoses sellega tuleb rakendada iga olemasolevat võimalust alternatiivsete energiaallikate kasutuselevõtuks. Asulaid, kus on võimalik kasutada lähikonnas asuvat biomassi, on üksikuid. Torma alevik on üks selliseid.

## Torma farmi bioenergeetiline potentsiaal

Torma asulas kasutatakse biogaasi tootmiseks Torma OÜ-le kuuluvast laudast kogunevat sõnnikut. Kuna tegu on lüpsilehmafarmiga, moodustub substraadina vedelsõnnik. Biogaas tekib substraadis sisalduvast orgaanilisest ainest. Kuna orgaanilise aine sisaldused on substraadist olenevalt erinevad, tuleb sisalduse leidmiseks teha arvutused aastas tekkiva sõnniku hulga kohta. Ühest vedelsõnnikus sisalduvast orgaanilise aine tonnist vabaneb 230 m<sup>3</sup> biogaasi. Tekkiva biogaasi koguse leidmiseks on kasutatud järgnevat valemit:

$$V_v = (S_v \cdot k_{\%v}) \cdot O_{\%v} \cdot s_{m3v}, \quad (1)$$

Kus  $V_v$  on tekkiv biogaasi kogus vedelsõnnikust, m<sup>3</sup>;  
 $S_v$  – kogu biogaasi tootmisel kasutatav vedelsõnnik, t/a;  
 $k_{\%v}$  – protsentuaalne kuivainete sisaldus vedelsõnnikus ( $k_{\%v}=8\%$ )[2];  
 $O_{\%v}$  – orgaanilise aine protsentuaalne sisaldus vedelsõnnikus kuivainest ( $O_{\%v}=79\%$ )[2];  
 $s_{m3v}$  – biogaasi saagis vedelsõnnikus sisalduvast orgaanilise aine tonnist, m<sup>3</sup>/t ( $s_{m3v}=230$  m<sup>3</sup>/t)[2].

Nimetatud farmis tekib arvutustest lähtuvalt 358280,4 m<sup>3</sup> biogaasi aastas. Kuna biogaasi metaanisisisaldus on 40...75%, siis biogaasi kütteväärtuseks on keskmiselt 22,5 MJ/m<sup>3</sup>. Sellest tulenevalt on aastas tekkiva biogaasi keskmine kütteväärtus 2239,25 MW•h. Kuna biogaasi eraldub

aasta jooksul ühtlaseks, kui reaktorit aastaringselt kindal temperatuuril hoida, siis tekib vahemikus novembrist märtsini soojusenergia puudujääk. Et suvekuudel biogaasi ei salvestata, tuleb soojusenergia vajaduse katmiseks leida alternatiivne meetod. Võimalus on kasutada rohusilo, mille lisamisel reaktorisse saab tekkiva puudujäägi katta. Soojusenergia puudujääk on 220,18 MW•h. Puudujääv biomassi kogus on leitud järgneva valemi abil:

$$S_s = (V_s / k_{\%S} \cdot O_{\%S} \cdot s_{m3S}) / M_m, \quad (2)$$

Kus  $V_s$  on biogaasi saagise kogus silost, m<sup>3</sup>;  
 $S_s$  – on kogu biogaasi tootmisel kasutatav silo, t/a;  
 $k_{\%S}$  – protsentuaalne kuivaine sisaldus silos ( $k_{\%S}=50\%$ ), [2];  
 $O_{\%S}$  – Orgaanilise aine protsentuaalne sisaldus silos sisalduvast kuivainest ( $O_{\%S}=80\%$ ), [2];  
 $s_{m3S}$  – biogaasi saagis silos sisalduvast orgaanilise aine tonnist, ( $s_{m3S}=400$  m<sup>3</sup>/t), [2];  
 $M_m$  – silo mahumass, t/m<sup>3</sup> ( $M_m=0,5$  t/m<sup>3</sup>), [3].

Arvutustest tulenevalt on puuduva soojusenergia tootmiseks biogaasi abil vaja kasutada 440,36 m<sup>3</sup> rohusilo. Rohusilo kulu jaotumine kuude lõikes ei ole ühtlane, millest tulenevalt tuleb selle jaotumine leida protsentuaalsete osahulkade kaudu. Et anda parem ülevaade kogu biogaasijaamas vaja minevast substraadi kogusest ja toodetavast biogaasist, on koostatud järgnev tabel (tabel 1).

**Tabel 1.** Sisend- ja väljundkoguste jaotus biogaasijaamas.

Kuu	Biomassi kuus, m <sup>3</sup>	Biomassi tunnis, m <sup>3</sup> /h	Biogaasi kuus, m <sup>3</sup>	Biogaasi tunnis, m <sup>3</sup> /h	Soojusenergiat kuus, MW•h	Keskmine soojusvõimsus, MW
Jaauar	2252,59	3,02	45774,8	61,52	286,09	0,38
Veebruar	2192,77	3,20	40953,7	60,94	255,96	0,38
Märts	2093,75	2,81	33027,3	44,39	206,42	0,28
Aprill	2053,94	2,85	29856,7	41,46	186,6	0,26
Mai	2053,94	2,76	29856,7	40,12	186,6	0,25
Juuni	2053,94	2,85	29856,7	41,46	186,6	0,26
Juuli	2053,94	2,76	29856,7	40,12	186,6	0,25
August	2053,94	2,76	29856,7	40,12	186,6	0,25
September	2053,94	2,85	29856,7	41,46	186,6	0,26
Oktoober	2053,94	2,76	29856,7	40,12	186,6	0,25
November	2055,16	2,85	29891,9	41,51	186,8	0,26
Detsember	2117,11	2,84	34929,6	46,94	218,31	0,29

Taoliste biogaasijaamade efektiivsust on võimalik tõsta paremate substraatide lisamisega, millest vabaneks rohkem biogaasi. Seoses sellega oleks samamahuliste biogaasijaamade rajamine reaalne ka suuremate asulate juurde, nende kas osalise või täieliku soojavajaduse rahuldamiseks. Kuna praegusel ajal Eesti elektriturul seadus väga soosib elektri tootmist taastuvenergiast, siis saab kiirendada ka investeringu tasuvust, kuna nimetatud seadus lubab toodetava soojuse vabastada soojusvahetitega õhku, makstes ikkagi taastuvenergiale kehtestatud elektrihinda 1,15 EEK/KWh.

## Biogaasijaamas tekkivad soojuskadod

Biogaasi tootmine toimub anaeroobse kääritamise meetodil. Kõige enam kasutatakse mesofiilset protsessi, mis toimub 30...35 C° juures. Kääritamisprotsess toimub reaktoris. Seal soojendatakse biomass kindlale temperatuurile, mille juures hakkab toimuma biogaasi eraldumine. Kasutusel on

kahte tüüpi reaktoreid: püstised ja rõhtsed. Antud uuringus on vaadeldud püstist reaktorit, kuna sellised mahutid on suurema mahutuvusega kui rõhtsed.

Mahuti on valatud betoonist, selle seinad on vahtplastiga väljastpoolt soojustatud ning puitkonstruktsioonil asetsev katus sama materjaliga kaetud. Vahtplasti peal asetseb omakorda kummist membraan, mis paisub või kahaneb vastavalt biogaasi eraldumise ja tarbimise kiirusele. Biomassi reaktoris edastamiseks kasutatakse pumpade süsteemi. Reaktori mahuks on valitud, vastavalt biomaasi tekkimisele kuus, 2500 m<sup>3</sup>. Reaktori kõrgus oleks antud mahu juures 12,5 m ja diameeter 16 m.

Kuna biomassi tuleb hoida keskkonnast kõrgemal temperatuuril, tekivad sellega seoses soojuskaod. Soojuskadude leidmiseks on läbi viidud arvutused, eraldi nii substraadi kui ka gaasiga täidetud osade ning lae ja põranda kohta (tabel 2). Arvutustes on kasutatud Eesti keskmisi kuutemperatuure.

**Tabel 2.** Reaktori poolt kasutatav soojusenergia

Kuu	Soojuskadu, $\Phi_1$ (W)	Tarbitav soojusenergia, (MW·h)
Jaanuar	14961,0	11,1
Veebruar	15099,9	10,2
Märts	14058,5	10,5
Aprill	12114,6	8,7
Mai	9684,8	7,2
Juuni	8296,3	5,9
Juuli	7567,3	5,6
August	7810,3	5,8
September	8990,5	6,5
Oktoober	11107,9	8,2
November	13190,7	9,5
Detsember	14613,9	10,9
Kokku		100,1

Soojuskadude kompenseerimiseks kasutatakse farmi katlamaja, mis on ühendatud reaktori küttesüsteemiga.

### Soojusenergia tarbimine Tormas

Kuna Torma tarbijatel puuduvad soojusarvestid, siis puudub ülevaade nende tegelikust soojusenergia tarbimisest. Arvutusliku ja projektijärgse tarbimise vaheline erinevus oli märkimisväärne.

Tegeliku soojatarbimise kujundamiseks on kasutusele võetud viimase kolme aasta statistika. Viimase kolme aasta keskmine soojatarbimine on olnud 1049,84 MW·h. Kuna asulas ei kasutata sooja vee tootmiseks keskküttevõrku, siis puudub suveperioodil soojusenergia tarbimine asulas täielikult. Lauda territooriumil asuv biogaasijaam varustab soojusenergiaga ka lauta, mistõttu tuleb tarbimise hulka arvestada lauda omatarve. Kahe lauda peale kokku tarbitakse 324,65 MW·h soojusenergiat, millest 1/3 kulub soojaveetarbe katmiseks. Kuna sooja vett kasutatakse aastaringselt, jääb suvisele perioodile 9 MW·h tarbimine kuus (tabel 3). Kogu asula soojusenergia tarbimine on 1597,9 MW·h, mille hulka on arvestatud ka trassikaod.

**Tabel 3.** Kogu soojustarbimine.

Kuu	Reaktori soojusenergia tarbimine MW•h	Laudakompleksi soojusenergia tarbimine MW•h	Asula soojusenergia tarbimine MW•h	Soojusenergia tarbimine kokku MW•h
Jaauar	11,1	54,408	220,4	285,9
Veebruar	10,2	49,468	196,4	256,0
Märts	10,5	40,956	155,05	206,5
Aprill	8,7	32,32	113,1	154,1
Mai	7,2	9,04	1,7	17,94
Juuni	5,9	9,04	0	14,94
Juuli	5,6	9,04	0	14,64
August	5,8	9,04	0	14,84
September	6,5	9,04	0	15,9
Oktoober	8,2	28,574	94,9	131,7
November	9,5	37,754	139,5	186,7
Detsember	10,9	42,88	164,4	218,18

### Majanduarvutus

Majandusanalüüsi koostamiseks on kasutatud *energyPRO* mudelit, kuhu on sisestatud biogaasijaamale ja keskküttevõrgule kohased parameetrid. Küttegraafikute arvutamisel on kasutatud *Eesti ilma* näidet ja projekti kogupikkuseks on arvestatud kakskümmend aastat. Kütustena on kasutusele võetud biogaas, mida kohapeal toodetakse, ja kiviõli S-1, mis on kasutusel lisakütusena, kui peaks midagi põhilise küttematerjaliga juhtuma. Katlamajas asuvateks kateldeks on valitud põhikatlana gaasikatel *Danstoker Global*, abikatlaks aga *Kiviõli 80*. Kuna biogaasi kogused on kohandatud vastavalt soojavajadusele, kasutatakse Kiviõli katelt üksnes juhtudel kui mõni gaasikateldest peaks rikke tõttu välja lülituma. Tarbijatena on arvestatud nii farmi kui ka asulat. Farm tagab ka suvise tarbimise, mille tõttu ei pea kogu suvel tekkivat biogaasi sellest tulu saamata ära põletama. Kuna tegemist on taastuvenergiaga, puudub sel CO<sub>2</sub> emissiooni maks, mis võimaldab kulude kokkuhoidu. Analüüsis on võetud keskmiseks aastaseks inflatsiooniks 5%.

Ainsa tuluna saab arvestada soojamüüki. Antud asulas on selleks kinnitatud hind 995 EEK/MW•h. Pikema prognoosi tegemisel on arvestatud sellega, et hind suureneb inflatsiooniga samas tempos, ehk 5% aastas.

Kogu kompleksis, mis hõlmab nii biogaasijaama kui ka keskküttevõrku on arvestatud nii muutuv- kui ka püsikulud. Muutuvkuludena on kajastatud neli erinevat kuluartiklit. Esimene nendest on tarbitud elekter, mille väärtuseks on võetud 70 EEK toodetud soojusenergia MW•h kohta. See koosneb katlamaja praegusest elektritarbimisest ja biogaasijaama poolt tarbitavast arvestuslikust elektri kogusest. Järgmisena on arvestatud kemikaalide kasutamist. Kuna antud tarbimisest ei ole kuude lõikes täpset ülevaadet, on aastaseks kogutarbeks arvestatud 2000 EEK. Kõige suuremaks kulutuseks kujuneb silo kokkuost. Et silo tootmine toimub lauda igapäevatööst eraldi, tuleb selle tarnimise eest farmerile tasuda. Silo hinnaks on võetud 0,3 EEK/kg. Muudeks kuludeks on arvestatud 6,8 EEK toodetud soojusenergia MW•h kohta. Selle hulka kuuluvad kõik erakorralised väljaminekud, mis võivad jaama töö käigus tekkida.

Püsikuludeks on arvestatud eraldi biogaasijaama ja katlamaja hoolduskulud. Hoolduskuludeks katlamajas on võetud 25 EEK/MW•h, mis tuleb taoliste väikekatlamajade kogemuslikust arvestusest Eestis. Kuna tegemist on gaasikatlamajaga, siis otseselt ei ole sinna töötajaid vaja. Sellega seoses on

arvestatud juhtimiskuludeks 60.000 EEK, mis koosneb katlamaja järelvalvele makstavast kulust. Hoolduskulud biogaasijaamas on 100.000 EEK [4]. Eraldi on arvestatud töötajate palgad. Arvestades praegust palka tööturul, on töötaja palgaks võetud 12.000 EEK. Biogaasijaama investeeringuks on 13.000.000 EEK, mille hulka kuulub jaama ehitus ja gaasitrassi rajamine jaamast kuni keskküttekatlamajani. Biogaasijaama ehitus maksab antud mahus 11.560.000 EEK [4] ja gaasitrassi rajamine 1.440.000 EEK.

Investeeringu finantseerimine toimub osaliselt omafinantseeringuna, osaliselt tuleks aga raha Maaelu arengukava 2007...2013 alameetmest 1.4.3 (*Investeeringud bioenergia tootmisesse*) ja Elukeskkonna arendamise rakenduskava alameetmest 5.3 (*Energiamajanduse arendamine*). Omafinantseeringu mahuks on arvestatud 4.500.000 EEK. Pangalaenu tagasimaksmine on arvestatud 10 aasta peale, millest esimene on maksevaba. Pangalaenu intressiks on arvestatud 5%. Arvestuslik sularahakonto enne investeeringut on 50.000 EEK. Sularahakonto maksustatakse positiivselt kontolt 3% ja negatiivselt 6%

## Kokkuvõte

Artikkel uurisib biogaasijaama rajamise võimalust Torma asulasse ja annab ülevaate sarnaste projektide potentsiaalsest tasuvusest. Biogaasijaama rajamise eesmärgiks oli stabiilsema hinnaga küttematerjali tagamine keskküttekatlamajja, ühtlasi lähistel asuvas farmis tekkivatest jääkproduktidest vabanemine. Biogaasi tootmisel võeti kasutusele laudas tekkiv vedelsõnnik, mille ärakasutamisel gaasikatlamajas vabanes soojus, mida hakati kasutama asula soojavajaduste rahuldamiseks. Et tänapäeval on energiaturu hinnad väga kõikumad eelkõige tänu fossiilsetele kütustele, siis just see põhjus on peamine, miks selliste investeeringute tegemine end ära tasub.

Kuna Euroopa Liit näeb ette üha laialdasemat üleminekut taastuvenergeetikale, siis ilmselt tekivad sarnastele projektidele järjest suuremad võimalused toetuse saamiseks, mis omakorda vähendab tunduvalt ettevõtjate omainvesteeringuid. Seoses sellega lisandub üha enam ettevõtjaid, kes nõustuvad sarnaseid muudatusi enda ettevõtetes teostama. Arvestades pidevat kütuste hinnatõusu, töötab taastuvenergiaallikate kasutuselevõtt kujuneda tulusaks ettevõtmiseks, mida piisava planeerimisega suudetakse rakendada paljudes kohtades.

## Kirjandus

1. Innovation and technological development in energy, Biomass action plan, URL: [http://ec.europa.eu/energy/res/biomass\\_action\\_plan/green\\_electricity\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/res/biomass_action_plan/green_electricity_en.htm) (31.04.2007).
2. Olt, J. (2006) Biogaasi tootmistehnoloogiad. Tartu.
3. Kuigo, H.; Leola, A.; Liiske, M.; Must, M.; Nööri, A.; Porila, M.; Reppo, B.; Saimre, B.; Teetsov, H.; Veinla, V.; Üts, H.; Zupping, A. (1970) Farmide Mehhaniseerimine. Tallinn, Valgus.
4. Institut für Energetik und Umwelt GmbH. (2006) Handreichung Biogasgewinnung und –nutzug, Gülzow.

# Kolme huvipoole suhtumine tuuleenergia tootmisesse Eestis

Janar Õunpuu

Tallinna Ülikooli keskkonnakorralduse õppetool

Fossiilsete kütuste varude piiratus ja hinna tõus on suurendanud kogu maailmas tähelepanu taastuvate energiaallikate kasutamisevõimalustele. Aastal 2004 võttis Riigikogu vastu *Kiituse ja energiamajanduse pikaajalise riikliku arengukava aastani 2015* [1], mis näeb ette soodustada taastuvate energiaallikate kasutamist. Eesti oludes on üks oluline taastuvenergia allikas tuuleenergia. Arenenud Kesk-Euroopa riikide ettevõtted, mis on kasutusse võtnud enamiku tuuleenergia tootmiseks sobivaid maid, otsivad aina võimalusi välisriikidesse, teiste seas ka Eestisse, laienemiseks. Seda huvi õhutab keskkonnapondide lubadus teha soodustusi tuule kasutamisega seotud investeeringutele just Ida-Euroopa ja endise Nõukogude Liidu koosseisu kuulunud riikides.

Tuuleenergia kasutamisevõimaluste ja selle kasutamisega kaasnevate probleemide kohta on esitatud mitmesuguseid seisukohti [2; 3; 4]. Samas puudusid siiani otsesed uuringud asjaosaliste (arendajad, kohalike omavalitsuste juhid, kohalikud elanikud) tuuleenergia-alase suhtumise selgitamiseks. Samas on Eestis on juba installeeritud tuulikuid koguvõimsusega 57,85MW [5].

Käesolev artikkel püüab esitada võrdleva ülevaate tuuleparkide rajamise ja nende tekitatud keskkonnamõjudega vahetult kokkupuutuvate inimeste (arendajad, kohaliku omavalitsuse juhid, kohalikud elanikud) kogemustest ja hoiakutest seoses tuuleenergeetikaga. Sealjuures on oluliseks nende vahetutu kogemuse mõju suhtumisele.

Uuringuga püüti selgitada, kui suur on tuuleenergia tootmise pooldajate osakaal. Küsimus pakub huvi, sest üldjuhul valitseb suurim vastuseis tuulearendus-projektidele just kohalike elanike seas. Veel soovis autor teada erinevate osapoolte suhtumist järgmistesse arendusprojektiga kaasnevatesse asjaoludesse:

- Kui lähedale maksimaalselt võiks elumajadele tuuleparke rajada?
- Kui palju tuulikuid tuulepargis peaks olema?
- Millal tuleks kohalikele elanikele informatsiooni anda?
- Millises mahus tuleks kohalikele elanikele informatsiooni jagada?

Need küsimused on olulised eelkõige põhjusel, et neile vastuste erinevuses tekivad osapoolte vahel tülid, mille tõttu projektide teostumine jääb venima. Artikkel tugineb kolmest erinevast allikast pärinevale infole: kirjalikest allikatest (õigusaktid, arengukava, ajakirjanduses ilmunud seisukohad), autori poolt läbi viidud ankeetküsitluste vastustest ja intervjuudest.

## Anketeerimine

Tuuleenergeetikaga vahetult seotud gruppide suhtumise uurimiseks koguti andmeid ankeetküsitlusega, mida täiendasid intervjuud ning meedias ilmunud materjalid.

Küsitletavad valiti sellel alusel, et nad elaksid tuuliku või tuulikupargi vahetus läheduses ning oleksid sellest mõjutatud. Omavalitsuste juhid valiti eelkõige sellel alusel, kas nende haldusalas oli installeeritud, installeerimisel või plaanis installeerida tuulegeneraatoreid või tuulikuparke. Küsitletud omavalitsuste juhid valiti vastavalt Eesti Tuuleenergia Assotsiatsiooni juhatuse esimehe Jaan Tepi soovitudele. Sama konsultatsiooni käigus valiti ka nende arendajate kontaktandmed, kes kas olid



juba Eestis teostanud mõne projekti tuuleenergeetika arendamise valdkonnas, või oli neil plaanis seda lähitulevikus teha.

Küsimustik koostati Euroopa Liidu tüüpprojekti *Intereg IIIc projekti Wind-Tech-Know* [6] raames, mis esialgselt teostati Saksamaa elanike hulgas projekti kontaktisiku Dr Manfred Bookholdti poolt, koostöös sealsete tuuleenergeetika spetsialistidega.

Kokku küsitleti 50 kohalikku elanikku, viit kohaliku omavalitsuse juhti ja viit arendajat. Kohalikud elanikud tagastasid kõik väljajagatud ankeedid, kohaliku omavalitsuse juhtidest vastasid kolm ning arendajatest ainult üks.

Kohalike elanike suur osavõtuprotsent küsitlusele vastamisel oli tingitud eelkõige sellest, et autor kohtus nendega isiklikult, selgitades põhjusi, miks seda küsitlust läbi viiakse. Kohalike omavalitsuste juhtide ja arendajatega suhtles autor elektronkirjade ja telefoni teel, kellest paljud vastasid, et neil pole aega sellega tutvuda ega vastata.

### **Arendaja suhtumine tuuleenergia tootmisesse**

Kuna vaid üks küsitletu andis vastuse, siis on siin kajastatudki vaid selle üksiku arendaja suhtumine. Teiste arendajate suhtumist on kajastatud meedias ilmunud artiklite põhjal. Vastanud arendaja oli seotud kahe tuuleenergia arendusprojektiga – Salme 1 MW tuulikuga ja Kunda 6,9 MW tuulikupargiga. Esimese projekti asukoht oli valitud ennekõike sealsete suurte tuuleressursside tõttu, kuigi määravaks said ka läheduses asuv alajaam ja kohaliku omavalitsuse varasem kogemus analoogsete projektidega. Teise projekti teostamiseks vajaliku alge andis Kundas paiknev tööstuslik areaal. Samas esineb selles paigas vähene otsene negatiivne keskkonnamõju ning Eesti Energia elektrivõrguga liitumisvõimaluste mitmekesisus. Valiku langetamise oluliseks põhjuseks oli ka kohalikul omavalitsuse suhteliselt suur huvi projekti vastu.

Planeerimisfaasis võttis konkreetne arendaja ühendust mitmete erinevate, projekti teostumise seisukohalt vajalike osapooltega. Nendeks olid kohalik omavalitsus, kellelt saadi positiivne reaktsioon ja toetav suhtumine projekti suhtes, planeerimisettevõtte, finantseerija, tuulikutarnija ja projekteerijad ning ehitajad, kes kõik toetasid projekti elluviimist ja lähenesid asjale professionaalselt. Samas oli ta võtnud ühendust elektrivõrgu haldajaga, kes küll oli kõigega nõustunud, tegi aga liitumise seisukohalt vägagi sobimatu hinnapakumise.

Kõnealuste projektide puhul said määravaks järgmised kriteeriumid. Salmes olid kättesaadavad finantsressursid ja alajaama vaba võimsus (1 MW), Kundas aga oli kolme tuuliku koht olemas ning koostöös investoriga valiti kõige turujõulisem tehnoloogia ja tarnija, kellel oli olemas kogemus Eestis tegutsemiseks. Samme, mis projektide käivitamiseks tehti, pidas arendaja ainumõeldavateks ja loogilisteks. Need olid koha valik, tuuleanalüüs, krundi suuruse analüüs, võrgu analüüs, tuulikute valik.

Tuulegeneraatoritele eriomase koha valikul said määravaks sobiva elektrivõrgu olemasolu ja sobiv ümbruskond. Sobiva paigani jõudmiseks tehti eelnevalt hulgaliselt eeltööd, analüüsides kaardimaterjali, teostades tuuleandmete eelanalüüsi, püstitades tuulemõõtemasti, pidades läbirääkimisi maaomanikega ja alustati planeeringuprotsessi. Majanduslikult osutunuks need projektid tasuvaks.

Probleeme esines arendajal mõlema projektiga. Salme puhul olid selleks konkurendid, kes tuuliku püstitamise vaidlustasid ning Kunda puhul maausuliste huvigrupid, kes leidsid, et valitud koht on täiesti sobimatu, kuna seal olla millalgi asunud püha hiis, kuigi käesoleval ajal pole sellest märkigi. Kummagi projektiga kaasnenud probleemid lahendati. Kui Salme puhul tuli läbida kõik

kohtuinstantsid, siis Kundas leiti lahendus lihtsamal viisil, analüüsides planeeringuprotsessi kõiki riske ning hankides detailplaneeringule kõik vajalikud kooskõlastused. Kuna maausulisi see siiski ei rahuldanud, kaevati Kunda linna otsus rajada hiimäele tuulepark, Kohtusse. Kohtuprotsess sai 17. oktoobril 2007 lahendi ja Riigikohus rahuldab maausuliste protesti. Arendajatel tuli kaaluda tuulepargi mujale projekteerimist.

Kui arendajal oleks võimalik samade projektidega uuesti alustada, teeks ta nii mõndagi teisiti. Näiteks analüüsiks ta asukohavalikut lähtuvalt võimalikest kõrvalriskidest nagu huvigrupid või konkurendid. Etapis, kuhu planeerija küsitluse ajaks oli jõudnud, vajanuks ta nõu ja abi riskihindamise ning elektrivõrkude ja tuulikute sobivuse analüüsimise valdkondades.

Arendaja arvates tuleks tuuleenergia kasutusele võtuks konkreetsemalt fikseerida seadusandlus. Paljud välisinvestorid ei kiirusta raha Eesti tuuleenergia arendusprojektidesse investeerima ning ootavad riikliku dotatsioonimäära kinnitamist. Sarnasel moel esitatud küsimused said kõigilt kolmelt osapoolelt küllaltki sarnase vastuse, ent arendajate vastused sarnanesid omaavalitsuse juhtide vastustele rohkem.

Arendaja arvates võiksid 5...10 tuulikut paikneda elumajadest umbes 800 meetri kaugusel. Ta oletas, et rohkem kui 70% kohalikest elanikest toetaks tuulegeneraatorite installeerimist oma kodu vahetusse naabrusesse. Arendaja leidis, et teostas teavitustöö õigeaegselt ning jagas kohalikele piisavalt määral vajalikku infot. Tuuleenergiaarendajana leidis vastanu, et Eesti Vabariigi Valitsusel tuleks kiiremas korras otsustada tuuleenergeetika doteerimine seaduseelnõus sätestatust märksa suuremas mahus, et arendajad oma projektidest ei loobuks. Loobumine tähendaks, et Eesti riik ei suudaks täita antud lubadust, mille kohaselt aastaks 2010 kogu energiast kasutatakse taastuvat energiat 5,1% ulatuses. Sellel oleksid aga arendaja meelest palju tõsisemad tagajärjed kui oli suurt poleemikat tekitanud suhkrutrahv. Nimelt kaotaks Eesti Vabariik seeläbi Kyoto protokollis kokkulepitud dotatsioonid ning trahv, mis tuleks Euroopa Liidule tasuda, oleks kümneid kui mitte sadu kordi suurem kui oli suhkrutrahv.

Suuremate tuuleparkide juhid on oma ettevõtete tulemustega rahul, kuigi tehtud investeeringud tasuvad end ära alles kümne aasta pärast. Eelmise aasta juunis tegevust alustanud Eesti suurima tuulepargi OÜ *Pakri Tuulepark* juhataja Martin Kruus ütles, et möödunud aasta tulemustega võib rahule jääda vaatamata sellele, et tootmismahd jäi planeeritust ligi 20 protsenti väiksemaks. Pakri tuulepargi eelmise aasta tulu elektrienergia müügist oli kokku üle 30 miljoni krooni, puhaskasum 4,5 miljonit krooni.

OÜ *Robeline Ring* juhataja ja omaniku Tullio Libliku sõnul annavad kaks tuulikut Virtsus igal aastal ligi paari miljoni krooni suurust käivet, mis peegeldab ka kasumi suurust, sest lisakulutusi pole ja tuulikute hooldusele kulub vähe raha. Libliku sõnul anti uutele tuulikutele kaasa kaheaastane garanti, mille jooksul hoolduse pärast polnud tarvis üldse muret tunda. Edasised aastased hoolduskulud jäävad Libliku sõnul suurusjärku 100.000 krooni tuuliku kohta. Seega suudetakse praeguse elektri hinna taseme juures 22 miljoni kroonine investeering tasa teenida 10...11 aastaga. Kuna tuulikute eluiga on üle paarikümne aasta, loodetakse ülejäänud aja eest saada puhastulu.

Tullio Liblik ei osanud küll seletada, millest see tuleb, aga mida aasta edasi, seda tugevamad on tuuled ja seda rohkem on tuulikud elektrienergiat tootnud. Liblik oli tulevikust rääkides optimistlik. Kuigi äriplaan nägi ette 3,2 GWh elektrienergia tootmist aastas, on tema sõnul tegelik seis parem [7].

## Omavalitsutsjuhtide suhtumine

Küsitlus saadeti välja viiele omavalitsuse juhile, kelle valla haldusalas juba on installeeritud või planeeriti installeerida tuuleparki. Küsitluse tagastasid Hanila vallavanem ning Kunda ja Paldiski linnapea.

Peamisi põhjusi, miks omavalitsus tuuleenergeetika projekte toetab, ei osanud Hanila vallavanem välja tuua, ent nii Paldiski kui ka Kunda linnapea põhjendasid tuuleenergia toetamist *roheline energiaga*, mille kasutamisega saab vähendada saastekoormust Eesti looduskeskkonnale.

Konkreetsete alade väljavalimisel lähtuti mitmest kriteeriumist. Näiteks Hanila vallas peeti silmas olemasolevat kõrgepingekaablit. Saaremaale transporditakse elektrit kahe jämeda kaabli abil, millel paiknevatel seadmetel on kindel püürvõimsus, mida pole võimalik ületada. Rõuste kanalile oli planeeritud kuni 20 tuulikut võimsusega kuni 30 MW. Teisel kanalil tekkis aga võimsuse ülejääk, kuna arutelude käigus ei leitud tuulikutele kohaseid paiku. See aga ei välista hilisemat sobivate alade leidmist, nagu praktika on näidanud. Näiteks arvati algul, et ka Virtsu asulasse rohkem elektrigeneraatoried ei installeerita, kuna sobivat kohta esmapilgul ei leidunud, kuid hiljem leiti tuulepargile sobiv paik, kuhu tuulikute installeerimine jätkub. Teiseks lähtuti sobivate alade valikul üldplaneeringust, mille üks arengusuundi Hanila vallas oli tuuleenergia arendamine. Kunda puhul lähtuti eelkõige sobivast paigast ning alajaama planeeringust tuulepargi vahetusse lähedusse. Paldiski puhul sai otsustavaks fakt, et ala oli endise Nõukogude Liidu sõjaväe objekt, mis ka üldplaneeringus oli ette nähtud tööstusmaastikuna.

Kohalikke elanikke informeeriti planeeringutest massiteabevahendite kaudu, eelkõige maakondlike ja kohalike ajalehtede vahendusel. Kunda linnas teavitati eraldi neid isikuid, kelle kinnistu piirnes plaanitava tuulepargi krundiga või kes elasid selle vahetus läheduses.

Sidepidamisprobleeme omavalitsuse juhid huvipoolte vahel ei täheldanud. Planeeringu eest vastutaja ei eksinud seaduse vastu puudus vajadus menetluse muutmiseks. Info edastati tähtitud kirjana, mille adressaadini toimetamisest oli võimalik jälgida. Isiku mittekontakteerumist omavalitsusega loeti talle esitatud lahenduse vastuvõetavaks tunnistamisena. Omavalitsus võttis enda kanda tegelemise vastuväidete ja pretensioonidega. Kunda puhul ilmnisid suuremad probleemid kahe huvigrupiga. Maausulised kuulutasid planeeritud piirkonna hiimäeks ning pidasid sellel igasugust ehitustegevust lubamatuks. Muinsuskaitse esindajad aga vajasid oma otsuse langetamiseks spetsiaalset ekspertisi, kuna endisel hiimäel asuvad ka kivikirstkalmed, mis olid niigi hiimäe lõunaküljel oleva endise karjääri tegevuses kannatada saanud.

Ükski kõnealustest vallavalitsustest polnud majanduslikult ühegi tuulikupargi projektiga seotud. Omavalitsuse juhtide hinnangul oli nende haldusalas teostatud tuulikupargi projektide planeerijate ja operaatorite vaheline koostöö olnud enamikel juhtudel positiivne ja konstruktiivne. Omavalitsuste juhid ei osanud hinnata, kas tuuleenergia kasutamine oleks ka õige ja edukas, kuna omavalitsused ise tuuleenergiat ei kasuta ega ole sõlminud roheline energia kasutamise lepingut.

Hanila vallavanem arutles millegi teisiti tegemise osas parema planeerimisoskuse üle, kuid et Eestis puuduvad vastavad normatiivid, tulebki oma tegevustes tugineda teiste EL liikmesriikide normidele. Konfliktide ja eriarvamuste puudumist valla ja arendajate vahel pidas ta positiivseks. Paldiski linnapea ei leidnud samuti muutmist väärivaid fakte. Kunda linnapea jättis küsimusele vastamata, kuna nende haldusalas olev projekt oli alles arendusjärgus.

Omavalitsuse juhid leidsid, et riik võiks kehtestada mingid ühtselt järgitavad normid analoogseteks toiminguteks, eriti kui arvestada, et Eestis polegi peale tuuleenergia eriti tõsiselt võetavaid alternatiivenergiat ressursse.

Omavalitsuse suhtumist tuuleenergiasse hindasid nende juhid positiivseks. Elanike suhtumist kirjeldas Hanila vallavanem valdavalt positiivsena. Pärast esimeste tuulikute rajamist pole tendentsid suhtumises negatiivsemaks muutunud, pigem vastupidi, kuna on kadunud ka senised hirmud. Pigem on hakatud ajakirjanikesse asjatu negatiivse eelinfo eest ettevaatlikumalt suhtuma. Näiteks kirjutati millalgi *Postimehes*, tuulikute, mis *hakkavad siigistormist tugevamaini möörgama*. Tegelikult pole tugeva tuulega neid hoopis kuuldagi, kuna tuule kiirusel 25 m/s jäävad tuulikud seisma.

Hanila vallavanem soovitas kahetlejatel ja pelglikel tulla paraja tuulega generaatori juurde oma silmaga asja uurima. Ka teised omavalitsusjuhid leidsid, et hirmude kõrvaldamiseks on vahetu kogemus kõige parem.

Elektrituuliku kaugust lähimale elumajale uuriv küsimus andis valikvastuseid alates 800 meetrist ja lõpetades enam kui 3000 meetriga. Tuulikutesse pooldavalt suhtuv Hanila vallavanem arvas, et see sõltub inimeste isikupärast, olles näinud Saksamaal elumaja seinast 6 meetri kaugusel paiknevat generaatorit ning kohanud inimesi, kelle meelest selliseid atribuute ei tohiks üldse paigaldada. Näiteks asuvad lausa Viini eeslinnas kaks tuulikut. Kunda ja Paldiski linnapead leidsid ühiselt, et tuuliku ja elumaja vahemaa peaks olema minimaalselt 800 meetrit.

Omavalitsusjuhid leidsid, et Eestis peaks seegi küsimus olema normeeritud. Näiteks on Saksamaa seadustikus tuuliku minimaalne kaugus eluhoonetest 300 meetrit. Normatiivide väljatöötamisel peaks arvestama generaatori tüüpi, võimsust, mürataset ja teisigi analoogseid parameetreid nagu näiteks ka valguse ja varju vaheldumist, mis kõik võivad suurendada generaatori soovitatavat distantsi eluhoonetest.

Tuulikutepargi suuruse osas andis Hanila vallavanem kaks tunnetuslikku varianti 5...10 või 11...15. Projektijuhti meelest sobiks võimalikult suurem kogum, mida oleks odavam rajada ja hallata. Paraku pole meie mererandades sedavõrd suuri lagedaid alasid, kuhu hiigelsuuri jõujaamu püstitada. Arendaja võiks tuulikuparke projekteerides ette näha proportsionaalselt suurema ala, et 1...4-tuulikulisele rühmale neid hiljem võimalusel lisada. Suuremates gruppides pole võimalik tuulikuid väga üksteise lähedusse paigutada, kuna minimaalsest väiksemate vahemaade korral hakkaksid nad teineteise tuulevoogu varjama ning elektritoodang langeks. Energiatootmise seisukohalt võiks ideaalseks pidada mõttes üksikut tuulikut mererannas. Samas aga oleks sellise üksiku tuuliku ühendamine ühtsesse elektrivõrku suhteliselt kõige kallim. Kunda linnapea pidas optimaalseks püstitatavate tuulikute hulgaks 1...4, samas kui Paldiski linnapea leidis, et optimaalne oleks mitte väiksem kui 11...15 või 16...20 tuulikust koosnev park.

Kõik küsitlusele vastanud omavalitsuste juhid olid seda meelt, et elanikke tuleb sedalaadi kavandamistest teavitada seadusega ettenähtud korras. Arvati, et kui seadus jääb ajale jalgu, siis tuleb seda muuta, mitte et arendaja oleks sunnitud tegema seadusevastaseid otsuseid.

### **Kohalike elanike suhtumine tuuleenergia kasutusse**

70% vastustest peeti taastuvate energiaallikate kasutust positiivseks, samas kui põlevkivi ja tuumaenergia rohket kasutamist toetas vaid 10% vastanutest. Taastuvenergiaallikate kasutamise küsimuses paluti vastata, kui suur peaks olema hüdro-, päikese-, tuuleenergia ja biomassi kasutamise osakaal. 70% vastanutest leidis, et tuuleenergiat tuleks kasutada rohkelt, samas hüdroenergia rohkele kasutamisele panustaks 60%, päikeseenergiale 40% ja biomassile vaid 10% vastanutest.

Küsimusele, kui suur peaks olema tuuleenergia osakaal elektrienergia kogutoodangust, jagunesid vastused suhteliselt võrdselt. 20% vastanutest leidsid, et tuuleenergia osakaal peaks moodustama kas 21...30%, 41...50% või lausa üle 60% energia kogutoodangust. 10% vastanutest leidis, et tuuleenergia maht elektri kogutoodangust peaks jääma kuni 10% piiresse.

Koguni 90% vastanutest pidas elektrituulikute peamiseks positiivseks küljeks elektri tootmist „mahedal” viisil. 70% tõi positiivsena välja, et see on alternatiiv traditsioonilistele energiaallikatele, kaitstes oma vähese keskkonnamõjuga kliima muutusi. Ülejäänud valivariandid majanduskasvu ja lisatulu kohta ei saanud vastajate olulist toetust ning mitte ükski ei arvanud, et elektrituulikute püstitamise positiivseks küljeks oleks uute töökohtade loomine.

80% vastanutest suhtus taastuvenergia ressursside kasutamisse positiivselt, ülejäänud neutraalselt. Samade osakaaluga suhtumine oli ka tuuleenergia tootmisesse. Samas kui 80% suhtus energia tootmisesse taastuvatest energiaressurssidest positiivselt, siis vaid 30% oluks nõus *robelise energia* eest rohkem maksma.

70% vastanutest leidis, et tuulikupark ei segaks neid, kui oleks paigaldatud asulast rohkem kui kolme kilomeetri kaugusele. Tuulegeneraatorite hulga osas leidis 60% vastanutest, et neid võiks olla 1...4, 20% meelest võiks neid olla pargis 5...10 ja vaid 10% oluks nõus ka suurema hulgaga.

### **Tuulepargi negatiivne mõju**

Negatiivse mõjuna märkisid kõik vastanud müra, 80% vastanutest aga rootori labade poolt põhjustatud valguse vilkumine. Et elektrituulikutel on ka oht loomadele, eriti lindudele või et see rikub vaadet, märkis vaid 40% vastanuist. Kuna kõigi vastanute kodud asusid tuulikupargile lähemal kui 800 meetrit, pidas valdav enamik neist tuulepargi asukohta ebasoodsaks.

Vaid üks inimene pidas tuuliku olemasolu oma kodu juures häirivaks, pidades negatiivseks kostuvat kolinat ja pidevat madalasageduslikku heli ning möödakihutavates autodes tolmu üles keerutavate uudistate rohkust, mille tõttu olevat ohtlik isegi teed ületada.


### **Informeeritus**

Suurem osa küsitletutest leidis, et neid ei informeeritud püstitatavast tuulikupargist sobivalt, pidades loomulikuks inimeste, vähemasti projektiga otseselt seotud maaomanike, suulist informeerimist. Vastajad oleksid soovinud, et avalikud arutelud oluks korraldatud ajal, mil inimesed on töölt vabad, eelistatavalt nädalavahetusel, mitte pärast pikka tööpäeva. Lisaks leiti, et informeerimine toimus liialt hilja.

Info tuulepargi rajamise plaanist jõudis inimesteni esmakordselt valdavalt maakondliku ajalehe kaudu. Osa inimesi leidis vastavat infot internetist või sai seda kuulujuttude tasemel. Külarahvas olla rääkinud, et võõrad mere ääres maad vaatamas käisid. Lisainfot said inimesed mitmetest erinevatest allikatest. Üheks neist olid keskkonnasaated Osoon, Keskkonnauudised, Peeter Ernitsa keskkonnaminutid ja Tasakaal televisioonis. Teiseks uudised raadiost ja kolmandks ajalehtedes, näiteks Lääne Elu, Postimees, Eesti Päevaleht, SL Õhtuleht, Äripäev, Maaleht. Samuti leidsid märkimist ajakirjad Horisont, Keskkonnatehnika, Eesti Loodus ning internetisaidid Virtsu ([www.virtsu.ee](http://www.virtsu.ee)), Roheline värav ([www.greengate.ee](http://www.greengate.ee)) ja Roheline energia ([www.roheline.energia.ee](http://www.roheline.energia.ee)).

Erinevalt omavalitsusjuhtidest, kes väitsid, et kohalikke informeeriti kõikvõimalike informatsioonikanaleid pidi, nentisid kõik küsitlusele vastanud elanikud, et ei investorid, omavalitsuse esindajad ega ka projekti elluviiva organisatsiooni esindajad ei võtnud nendega enne tuulikupargi püstitamist ühendust ega teavitanud neid mingil moel. Ükski tuulikupargi lähedal või lausa kõrval elav elanik pole tuulikupargi projekti osanik ega ole osalenud ka planeerimise ega juurutamise protsessis.

Pooled vastanutest leidsid, et omavalitsus suhtub tuulikuparkide projektidesse vägagi positiivselt ning



kolmandikule on omavalitsuse suhtumine jäänud ebaselgeks. 60% arvas, et omavalitsus teenib kõnealuste projektide juurutamisega umbes 10.000 eurot või rohkemgi ning 40% pidas teenitavat summat veidi tagasihoidlikumaks.

## Kokkuvõte

Üldiselt olid nii arendajate, omavalitsusjuhtide kui ka kohalike elanike arvamused tuuleenergia arendamise osas sarnased, erinedes vaid mõnes punktis kardinaalselt.

Tuulikuparkide toetajaid oli kohalike elanike seas 80%, ülejäänud suhtusid neutraalselt. Arendajad ja omavalitsusjuhid suhtusid tuuleenergia tootmisesse äärmiselt positiivselt ning oletasid, et kohalike elanike seas on selle arendamise toetajaid üle 70%. Omavalitsusjuhid pidasid võimalikuks, et toetajate protsent võib küündida isegi 100%-ni. Leiti, et tuuleenergiat tuleks Eestis rohkem toota ja kasutada.

Kõik osapooled pidasid tuulepargi ja elamutele optimaalseks distantiks 800 meetrit. Valdav osa elanikest pidas sobivaks tuulepargi suuruseks 1...4 tuulikut, arendajad ja omavalitsuse esindajad leidsid, et neid võiks olla kas 5...10 või koguni kuni 20, kuna väiksem hulk poleks majanduslikult ökonoomne.

Kui arendajad ja omavalitsusjuhid leidsid, et infot planeeritavate tuuleparkide kohta jagati õigeaegselt, siis kohalike elanike hulgast nõustusid sellega 40%. Enamasti leiti, et info jagamine toimus kas liialt vara või liiga hilja. Ühel nõul ei olnud ka info mahu osas. Näiteks leidsid omavalitsuse juhid, et elanikele tuleb jagada täielik info, arendajad aga olid seisukohal, et kindlasti mitte täies mahus. Kohalikud elanikud soovisid, et infot jagati neile liiga.

## Kirjandus

1. Kütuse ja energiamajanduse pikaajalise riikliku arengukava aastani 2015 RTI, 23.12.2004
2. Eesti elektrimajanduse arengukava 2005...2015
3. Elektrituruseadus 15.02.2007 (RTI 2007, 23, 120) 1.05.2007, osaliselt 1.01.2009 ja 1.01.2010
4. Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon (2004) Elektrituulikute keskkonnamõjude hindamise käsiraamat
5. Estonian Wind Power Association (2007) homepage. URL: [www.tuuleenergia.ee](http://www.tuuleenergia.ee) [26.10.2007]
6. Wind-Tech-Know Project (2007) homepage. URL: [www.windtechknow.net](http://www.windtechknow.net) [26.10.2007]
7. Freiberg, E. (2006) Tuulepark tasub end ära kümne aastaga. Äripäev, 03.04.2006.

# Reovee jääkmuda mõju paju kasvule

Kaili Kattai

Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituut

## Energiavõsa

Kiirekasvuliste puuliikide kasvatamine puidu biomassist saadava energia eesmärgil on üheks taastuva energia allikaks. Seega vähendatakse sõltuvust taastumatutest fossiilsetest kütustest ning ollakse keskkonnasäästlikud. Kaasaegse põllumajanduspoliitika tulemusel ning turumajandussituatsioonist lähtuvalt on põllumajanduslikust kasutusest välja jäänud palju maid. Varem oli maapiirkondade tuluallikaks põllumajandus. Lähtudes muutunud turusituatsioonist on vaja sellele alternatiive leida.

Üheks alternatiiviks tavapõllumajandusele võiks olla paju kasvatamine energiavõsana. Kasutusest välja jäänud põllumaadele soovitatakse rajada lehtpuukultuure. Okaspuud (kuusk ja mänd) on selleks enamikul juhtudest sobimatud, sest põllumullad erinevad metsamuldadest füüsikaliste ja keemiliste omaduste poolest. Nii karjamaa- kui põllumuld on tavaliselt õhuvaene. Põllumullas leiduvad kergesti lahustuvad lämmastikuühendid soodustavad juurepessu levikut [14].

Energiavõsa kasvatamisel on mitmeid keskkonnakaitselisi kasutuseeliseid. Võrreldes üheaastaste põllukultuuridega ei kasutata mitmeaastastel pajukultuuridel nii palju herbitsiide. Aja jooksul huumuse sisaldus mullas suureneb, sest mulla pinnale langeb suures koguses väiksemaid oksakesi ja lehti ning põldu ei harita, seega ei häirita ka mullafaunat [10]. Võrreldes fossiilsete kütuste põletamisega on CO<sub>2</sub> lisandumine lühiajaliste puude kasutustsükli atmosfääri minimaalne, sest põletamise käigus atmosfääri eraldunud CO<sub>2</sub> seotakse uuesti puude kasvu käigus. Lisaks saab pajuistandust kasutada reovee puhastajana, reovee jääkmuda utiliseerimisel ning prügila nõrgvee puhastamisel [15].

Paju kiirekasvulise liigina energia tootmiseks hakkas huvi pakkuma Rootsis ja Soomes 1980-ndate aastate alguses. Viimasel 20 aastal on eksperimentides enim kasutusel olnud liigid *Salix dasyclados*, *S. burjatica*, *S. schwerinii*, *S. viminalis* ning nende hübriidid [18]. Alates 1993. aastast on Eestis läbi viidud uuringuid Rootsi istutusmaterjaliga, et leida siinsetes oludes produktiivseid paju kloone [6]. Pajude produktiivsus tõuseb toitaine lisamisel mulda. Kirjanduse andmeil moodustavad väetamisele tehtavad kulutused 80% kogu energiavõsa hoolduskuludest [3]. Vähendamaks kulutusi väetistele, võib kasutada pajude väetamiseks reovee jääkmuda.

Erinevate pajuliikidel on uuritud reovee jääkmuda mõju puidu biomassile. Võrreldes teiste pajuliikidega on *Salix viminalis* andnud kõige suuremat puidu biomassi reovee jääkmudaga väetamisel [9]. Samuti on nimetatud liigil võrreldes liikidega *S. petiolaris* ja *S. discolor* madalaim vee- ja tuhasisaldus. Samal liigil katses väetatuna kõrgeima lämmastiku kogusega (300 kg/ha) oli puidu kütteväärtus suurim [9].

## Kiirekasvulised puuliigid

Meie kliimavöötmes on tehtud uuringuid, leidmaks energiavõsaks sobivaid kiirekasvulisi liike. Kirjanduse andmeil on Eesti tingimustes kõige kiirekasvulisemateks puuliikideks pajud [21]. Teised meie kliimatingimustes sobivad kiirekasvulised puud on haavad ja lepad. Liigiliselt on need harilik haab (*Populus tremula*), hübriidhaab (*Populus × wettsteinii*; *Populus tremula* × *Populus tremuloides*), triploidne haab (*Populus tremula* f. *gigas*) [24], hall lepp (*Alnus incana*), sanglepp (*Alnus glutinosa*), hübriidlepp (*Alnus incana* × *Alnus glutinosa*) [21].

Harilik haab on kiirekasvuline, eriti noores eas, mil aastane kõrguskasv võib olla rohkem kui meeter. Vanemas eas tüve juurdekasv langeb, levib ka tüvemädanik. Seepärast on näiteks Rootsis soovitatud kasutada energiapuidu saamiseks 10...20-a raieringi, kuigi hariliku haava eluiga on 120...150 aastat. Kümneaastases haavikus võib hektaritagavara olla kuni 50 tihumeetrit [24].

Triploidne haab on, nagu tema nimigi ütleb, hariliku haava triploidse kromosoomistikuga ( $3n=57$ ) teisend. Teda peetakse võrreldes hariliku haava diploidse ( $2n=38$ ) vormiga mädanikele vastupidavamaks ja ka kiirekasvulisemaks [24].

Hübriidhaab on hariliku ja ameerika haava ristand. Triploidne hübriidhaab on saadud tetraploidse ja diploidse vanema ristamisest. Näiteks Rootsis on triploidsete hübriidhaabade kasvukiirus suurem kui diploidsetel hübriidhaabadel [24]. Hübriidhaab on eriti kiire kasvuga, kuna võib juurdekasvus ületada harilikku ja ameerika haaba kuni kaks korda [19]. Paberipuiduks kasutamisel saavutab hübriidhaab raieküpsuse 20...25-aastaselt, hektaritagavaraks võib olla kuni 400 tihumeetrit [24]. Hübriidhaava kasv algab kevadel umbes nädal varem, sügisel aga langevad lehed kuu aega hiljem võrreldes hariliku haavaga, mida loetaksegi üheks kiirekasvulisuse põhjuseks [19]. Pikem kasvuperiood hübriidhaaval võib aga põhjustada ka kevadiste hiliskülmade ning sügiseste varakülmade kahjustusi [24]. Hübriidhaab on võrreldes hariliku haavaga ka paremini laasuv ja sirgema tüvega. See liik sobib väga hästi paberi tootmiseks – kuna selle puit on hele, ei ole trvis nii palju keskkonda reostavaid pleegitusaineid [19].

Hall lepp on kiirekasvuline, lühialine (50...70 a) ja külmakindel. Uri [22] andmeil oli neljandal istutusjärgsel aastal halli lepa maapealne biomass 12,3 t/ha (algtihedusega 15.750 taime/ha). Halli leppa on kasvatatud ka energiavõõsana, kui puit varutakse hakkena võõsakombainide abil. Rootsis soovitatakse sel juhul väga lühikest raieringi, vaid 6...7 aastat [20].

Sanglepa puit on halli lepa puidust väärtuslikum, kuid ta on nõudlikum kasvutingimuste suhtes, vajades liikuvat põhjavett [20]. Sanglepakultuuri maapealne biomass võib nelja aastase kasvuperioodi järel olla 15,8 t/ha. Varese [23] poolt teostatud uurimuses oli 20-aastase sanglepiku maapealne biomass 80,3 t/ha.

Hübriidlepp on halli lepa ja sanglepa ristand, puit sarnaneb sanglepa puidule ning ta on hallist lepast kiirekasvulisem [20]. Seda liiki esineb nii Eestis kui ka kogu Baltikumis looduslikult üsna harva [22]. Hübriidlepa maapealne biomass oli katsekultuuris Uri andmeil 6,15 t/ha (algtihedus 6.700 taime/ha). Lepad seovad õhulämmastikku, mistõttu on nad meie kliimavöötmes eriti perspektiivikad, kuna boreaalsete metsade kasvu limiteerivaks teguriks ongi lämmastiku kättesaadavus [20].

Pajusid sobib kasvatada energiavõõsana, kuna nad annavad peale korduvaid lõikusi hulgaliselt kannuvõõsusi. Istandus on lõikusküps siis, kui aastane juurdekasv stabiliseerub ega suurene (3...7 aasta pärast). Tüved lõigatakse maha ning tsükkel kordub. Pajuistanduse eluiga on 20...30 aastat [16]. Pajuistanduse puiduproduktisioon nelja-aastase kasvuperioodi lõpuks on keskmiselt 44 tonni kuiva puitu hektarilt [3].

Rootsi ettevõtte *Svalöf Weibull AB* on aretanud uusi sorte ja kloone, et taimed oleksid saagikamad ning vastupidavamad haigustele, kahjuritele ja külmale. Näiteks klooni Jorr (*Salix viminalis*) iseloomustab resistentsus leheroostele, kiire kasv istutusaastal, vähene külmakartlikkus. Kloon Tora (*S. schwerinii* × *S. viminalis*) on väga kõrge saagikusega, resistentsne leheroostele, kahjustused imetajate poolt on olnud minimaalsed. Sarnaste omadustega on ka kloon Björn (*S. schwerinii* × *S. viminalis*), kuid saagikuselt jääb veidi alla kloon Torale [30].



## Katses kasutatud pajude liigikirjeldus

Perekonda *Salix* kuulub üle 300 liigi ning hulgaliselt hübriide. Pajude levik on väga laialdane, neid kasvab kõigis maailmajagudes, välja arvatud Austraalias. Põhjapoolkeral kasvab neid eriti rohkesti. Eestis kasvab 21 pajuliiki. *Salix viminalis* ja *Salix dasyclados* kuuluvad alam perekonda *Vetrix* [8].

*Salix viminalis* L. – vitspaju (korvipaju) esineb enamasti 2...6-meetrise põõsa kuni 10-m puu kujul. Sirged võrsed on üsna jämedad, rohekashallid, noorelt kaetud tihedate hallide sametjate karvadega, vanemalt paljad [8]. Pungad on tõmbitipulised, lamedad, kujult piklikmunajad või süstjad [7], hoiavad võrse ligi ning on sellega samas toonis. Lehed on noorena pealt kaetud läikivate siidkarvadega, hiljem paljad, lehe alumisel küljel paiknevad siidkarvakesed külgroodudega paralleelselt. Lehe pikkus on 5...15 (20) cm, laius 0,7...1,5 (2,0) cm, laiem koht on enamasti allpool keskohta. Kujult lineaalsüstjad, terveservalised, allapööratud servadega [8]. Tugev pearood on valkjas- või roosakaskollane, abilehed kitsassüstjad ja varisevad varakult. Õie kattesoomused on siidjaskarvased, tipp mustjaspruun, kujult piklikud või piklikmunajad [7]. Isasurvad on 3...4 cm pikad, kahe tolmukaga, emasurvad 4...6 cm. *Salix viminalis* õitseb enne lehtimist või sellega samaaegselt. Kasvab peaaegu igasugustel muldadel, kuid ei talu soostunud, seisva põhjaveega alasid. On väga kiirekasvuline ja paljuneb hästi pistokstest [8].

*Salix dasyclados* Wimm. – pikalehine paju on 4...8-meetrine põõsas. Võrsed sametkarvased, värvuselt kollased, rohekaskollased või pruunid. Lehed on hõrekarvased, pealt läikivad ning alt sinakasrohelist. Lehe pikkus 8...16 (20) cm, laius 2...3 cm, kujult pikliksüstjad. Lehe servas on üksikud näärmed, serv lainjassakiline ning alla rullunud [8]. Lehtede kesk- ja külgrood on kollased, rootsu pikkus 0,8...1,5 cm. Pungad on karvased, ovaalsed. Abilehed on suured ja näärmeliselt saagia servaga. Urvad 3...5 cm, kahe tolmukaga. Õie kattesoomused mustjaspruunid, valgete pikkade siidkarvadega. Urva alusel 2...4 lehekest, mis puhkevad enne lehti [7].

Uurimuse eesmärgiks oli kindlaks teha reovee jääkmuda mõju liikide *Salix viminalis* ja *Salix dasyclados* erinevate kloonide kasvule ning välja selgitada, millistel kloonidel suurendab reovee jääkmudaga väetamine kõige enam puidu biomassi. Ühtlasi püüti selgitada toitainete ning raskmetallide väljakannet mullavette reovee jääkmudaga väetamisel.

## Vaatlusala kirjeldus

Nõo pajuistandus asub Tartust 15 km lõuna suunas, olles üks seitsmest 1990-ndate aastate alguses rajatud pajuistandusest [6]. Ala on varem olnud kasutusel põlluna. Mullatüübiks on pruun kahkjase ehk näivleetunud muld, mis on kujunenud kahekihilisel erinevate omadustega lõimisel, ülemises kihis kergema ja alumises raskema lõimisega. Muld on suhteliselt madala lämmastikusisaldusega, kaaliumi ja fosfori sisaldus on kõrge ning see on nõrgalt happeline ( $\text{pH}_{\text{KCL}}$  5,3). Nõo istandus rajati 1995. aasta mais, suurusega 0,91 ha. Pajuistanduse rajamiseks kasutati liike vitspaju (*Salix viminalis*), kloone 78101, 82007, 78112, 78021, 78183 ja 78195 ning pikalehine paju (*Salix dasyclados*), klooni 81090.

Pajukloonid on toodud Rootsi Põllumajandusülikoolist ja kloonide numbrid vastavad Rootsi kloonide numbrisüsteemile [6]. Kloonid valiti välja sõltuvalt nende omadustest – haiguskindlus, eriti kiire kasv, kliimasobivus jne.

Pajuistandus rajati umbes 20 cm pikkustest juurdumata pistokstest. Taimed istutati paarisridadesse, taimedevahelise kaugusega 50 cm, ridadevahelise kaugusega 75 cm, kusjuures paarisrea vahemaa oli 125 cm. Seega oli taimede istutustihedus 2 taime  $\text{m}^2$  kohta ehk 20.000 taime hektaril.

Juulis 1995 tehti kaks korda mehaanilist umbrohutõrjet (äestamist). Keemilist umbrohutõrjet tehti 9. mail 1995, kasutades herbitsiidi *Roundup* (4 l/ha), 21...22. mail herbitsiidiga *Gardoprim* (3 l/ha) [6].

1999. a talvel lõigati pajud maapinnast umbes 5 cm kõrguselt maha. Järgneval kevadel väetati umbes poolt (0,435 ha) istandust AS Tartu Veevärk pärineva kompostitud reovee jääkmudaga.

Jääkmuda kuivaine sisaldus oli 35% ja  $\text{pH}_{\text{KCL}} = 7,9$ . Väetamiseks kasutati sõnnikulaoturit. Jääkmuda koormus 0,435 ha oli ligikaudu 18 tonni. Kasutatud reovee jääkmuda iseloomustus on tabelis 1. Välitööde ajal oli suurem osa pajukloonide uuritavatest võsudest kaheaastased, erandiks kloon 78183, mille võsud olid röövraiete tagajärjel üheaastased ning kloon 82007, mille paljud võsud olid kolmeaastased.

**Tabel 1.** Kasutatud reovee jääkmuda iseloomustus

Näitaja	Sisaldus muda kuivaines mg/kg	Koormus kg/ha
N (üld.)	21.000	304
P	15.000	217
K	3200	46
Ca	49.000	709
Mg	8.600	125
Cd	3,7	0,05
Cr	180	2,6
Cu	160	2,3
Ni	200	2,9
Pb	43	0,6
Zn	1100	15,9
Hg	1,2	0,02

## Mõõtmismeetodid

Oktoobris 2002 korjati kloonidelt 78021, 78183, (*Salix viminalis*), 81090 (*Salix dasyclados*) nii väetatud ja kui väetamata alalt 30 mudeloksa, mis lõigati 5 cm kõrguselt maapinnast. Okstel mõõdeti üldpikkus ning diameeter 55 cm kaugusel lõikepinnast ( $D_{55}$ ). Kõik oksad kuivatati (kuivatuskapis Termaks) 80 °C juures konstantse kaalu saavutamiseni ning seejärel kaaluti (kaal KERN KB).

Märtsis 2003 mõõdeti väetatud ja väetamata alal iga klooni 30 taimel kõikide elavate võsude  $D_{55}$ . Mõõdetavad taimed olid valitud juhuslikult ning tähistatud juurekaelal punase värvusega, et tagada samade taimede mõõtmine igal aastal. Võsude diameetrid mõõdeti digitaalse nihkkaliibriga (toote nr 07157611) millimeetrites.

**Tabel 2.** Parameetrid taime diameetri ja kuivmassi allomeetrilise suhte leidmiseks

Kloon	Väetus	a	b	n*	R <sup>2</sup>
78021	väetamata	0,224	2,4043	30	0,98
78021	väetatud	0,077	2,7934	29	0,99
78183	väetamata	0,1391	2,4949	28	0,94
78183	väetatud	0,1184	2,5636	6	0,91
81090	väetamata	0,1776	2,4022	23	0,97
81090	väetatud	0,296	2,1835	22	0,95
ülejääänud	väetamata	0,1639	2,5537	81	0,96
ülejääänud	väetatud	0,1234	2,6308	57	0,99

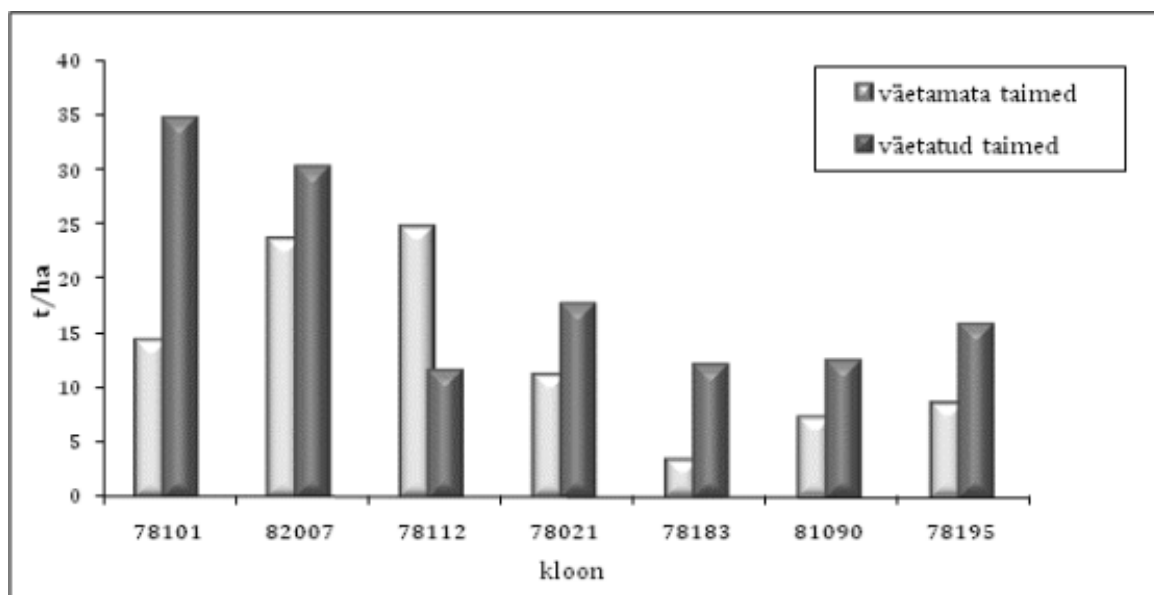
\* n – taimede arv

$D_{55}$  ja kuivmassi (M) allomeetrilise suhte leidmiseks kasutati võrrandit:  $M = aD_{55}^b$ . Astmefunktsiooni parameetrid a ja b (tabel 2) leiti programmiga TableCurve 1.0. Nende kloonide jaoks, mille mudeloksi ei kogutud, leiti sama astmefunktsiooni parameetrid kõikide samal päeval korjatud väetatud või

väetamata *Salix viminalis* mudeloksade põhjal (tabelis 2 märke ülejäänud). Saadud parameetrite abil arvutati istanduses mõõdetud elusate taimede kuivmass.

Väetamata ja väetatud taimede võrdlemiseks kasutati *MS Exceli* keskkonnas *Studenti t-testi*, ebavõrdsate varieeruvuste korral. Olulisuse nivooks oli kõikides analüüsides 0,05.

Toitainete leostumist mulla nõrgvette uuriti lüsimetritega, mis olid paigutatud väetamata ja väetatud alale, mõlemal juhul kahes erinevas kohas. Maapinnast 10 ja 40 cm sügavusel olid kindla pindalaga metallist plaadid, mis asetsesid maa sees 2° nurga all, et mullast nõrgunud vesi jõuaks kogumisnõusse. Kogumisnõus oli voolik, mille kaudu plaadile kogunenud vedelik imeti proovinõusse. Mullast nõrgunud vett analüüsiti OÜ Tartu Keskkonnauuringud laboris.



Joonis 1. Erinevate pajukloonide puidu biomass väetatud ja väetamata ruutudel (t/ha).

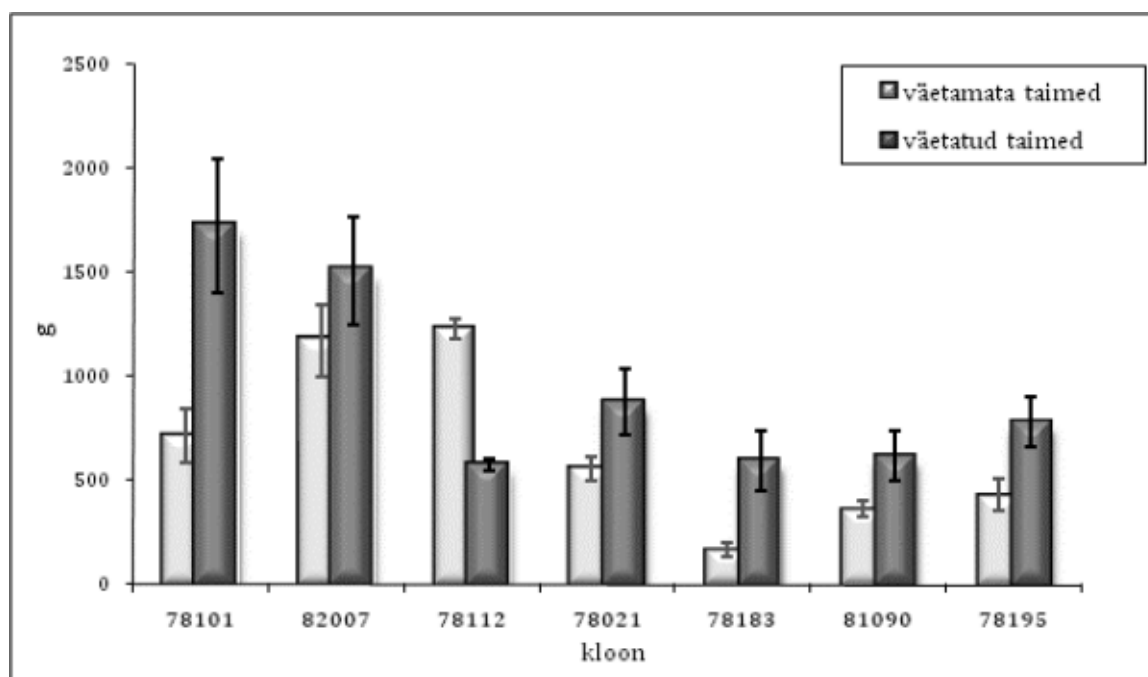
### Kloonide puidu produktsioon

Töös kasutatud paju kloonide produktsioon oli väga erinev (joonis 1). Väetamata alal oli puidu biomass suurim (24,6 t/ha) kloonil 78112. Sarnane oli puidu biomass väetamata alal (23,5 t/ha) ka kloonil 82007. Madalaim puidu biomass (3,4 t/ha) väetamata alal oli kloonil 78183. Kloonil 81090 oli puidu biomass väetamata alal üle kolme korra madalam (7,3 t/ha) võrreldes klooniga 78112. Väetatud ala suurima (34,6 t/ha) puidu biomassiga oli kloon 78101. Puidu biomass oli kõrge (30,2 t/ha) ka kloonil 82007. Eelnevaist kloonidest poole võrra madalama puidu biomassiga väetatud alal olid kloonid 78021 ja 78195, vastavalt 17,5 ja 15,7 t/ha. Väetatuist madalaima puidu biomassiga oli kloon 78112 – vaid 11,6 t/ha.

### Väetamise mõju taimede keskmistele kuivmassidele

Erinevate pajukloonide ja -liikide (*Salix viminalis*, kloonid 78101, 82007, 78112, 78021, 78183, 78195 ja *Salix dasyclados*, kloon 81090) väetamine reovee jääkmudaga enamasti suurendas puidu biomassi. Ainsaks erandiks oli kloon 78112, mille keskmine kuivmass kontrollalal oli suurem kui jääkmudaga väetatud alal, vastavalt 1223 g ja 579 g. Kõige rohkem (70%) tõstis väetamine taimede keskmist kuivmassi kloonil 78183 (joonis 2). Oluliselt mõjus väetamine ka kloonile 78101, kus väetamata alal oli keskmine kuivmass 718 g ja väetatud alal 1731 g, mis tähendab 2,4-kordset erinevust.

Kloon 78021 väetatud ala taimede keskmine kuivmass (877 g) oli väetamata ala keskmisest kuivmassist (561 g) samuti suurem. Kloonil 81090 ja 78195 oli väetatud taimede keskmine kuivmass (vastavalt 620 ja 783 g) ligi kaks korda kõrgem väetamata taimedest (vastavalt 364 ja 430 g).

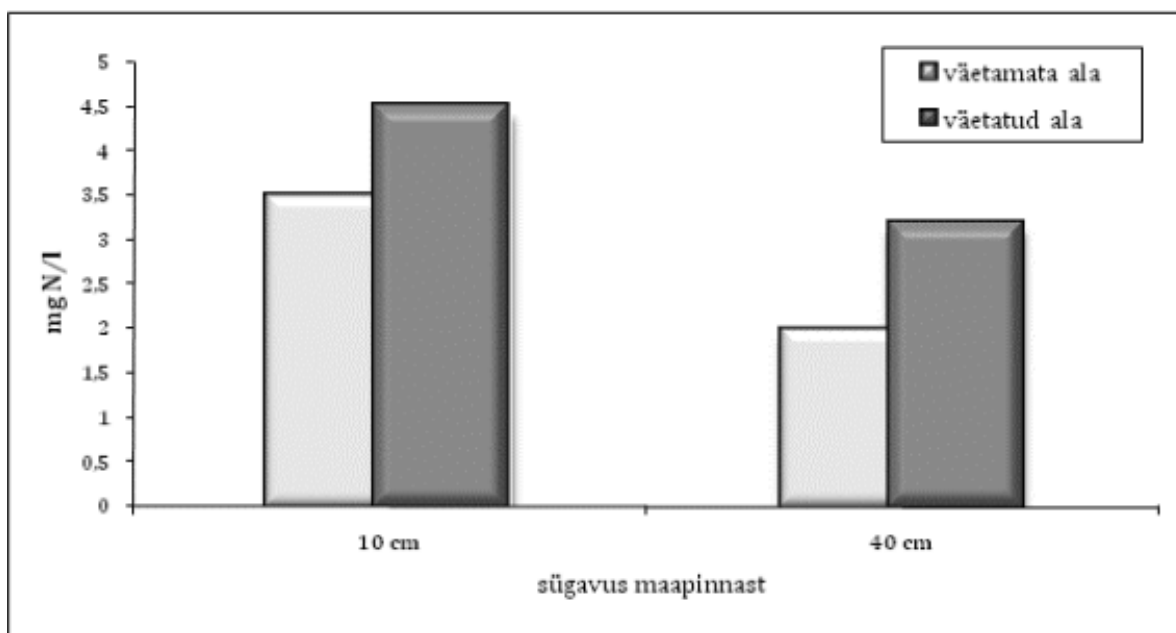


**Joonis 2.** Taimede keskmine puidu kuivmass (g) koos standardveaga.

Kõige vähem (20%) suurendas väetamine taime keskmist puidu kuivmassi kloonil 82007, väetamata alal oli keskmine kuivmass 1174 g ja väetatud alal 1511 g. Väetamise mõju pajudele oli statistiliselt oluline kloonidel 78101, 82007, 78021, 78183, 81090 (tabel 3).

**Tabel 3.** Taimede keskmiste kuivmasside võrdlus väetatud ja väetamata alal.

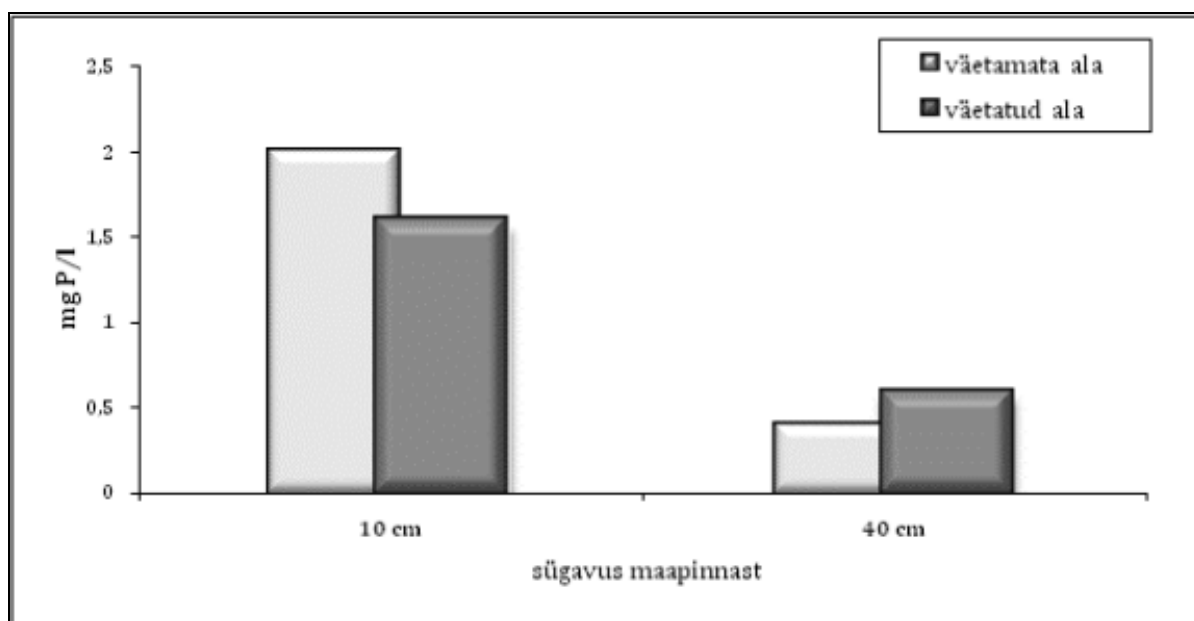
Kloon	Olulisuse tõenäosus
78101	0,003
82007	0,0002
78112	0,11
78021	0,003
78183	0,0002
81090	0,03
78195	0,35



**Joonis 3.** N keskmine sisaldus (mg/l), mullast nõrgunud vees reovee jääkmudaga väetatud ja väetamata alade erinevatel sügavustel (10 ja 40 cm).

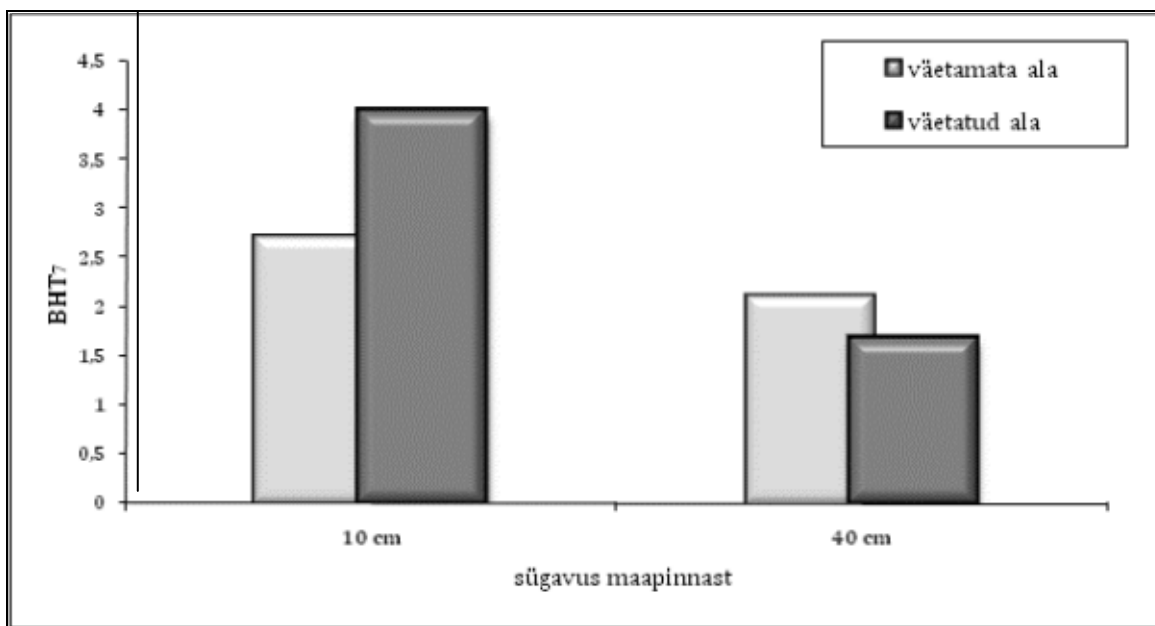
#### Ainete väljakanne 10 ja 40 cm sügavusele mullavette

Mulla nõrgvee lämmastiksisaldus oli keskmiselt suurem reovee jääkmudaga väetatud kui väetamata aladel (joonis 3).



**Joonis 4.** P sisaldus (mg/l) mullast nõrgunud vees reovee jääkmudaga väetatud ja väetamata alade erinevatel sügavustel (10 ja 40 cm).

Kõige enam leostus lämmastikku vette väetatud alal 10 cm sügavusele, keskmiselt 4,5 mg/l. Väetamata (10 cm) ja väetatud (40 cm) aladel oli keskmine leostunud lämmastiku kogus sarnane, vastavalt 3,5 ja 3,2 mg/l. Kõige vähem leostus lämmastikku mullast nõrgunud vette väetamata ala 40 cm sügavusele – keskmiselt 2 mg/l.



**Joonis 5.** BHT<sub>7</sub> sisaldus (mg O/l) mullast nõrgunud vees reovee jääkmudaga väetatud ja väetamata alade erinevatel sügavustel (10 ja 40 cm).

Suurim keskmine fosfori kogus, mis mullast nõrgunud vette leostus, oli 2 mg/l väetamata ala 10 cm sügavusel, väetatud ala vastav näitaja oli 1,6 mg/l (joonis 4). Väetamata ala 40 cm sügavusel jäi leostunud fosfori kogus viis korda madalamaks võrreldes väetamata alaga 10 cm sügavusel (0,4 mg/l). Väetatud ala 40 cm sügavusel oli mullast nõrgunud vette leostunud keskmine fosfori kogus veidi suurem (0,6 mg/l) kui väetamata ala 40 cm sügavusel. Kõige enam leidis orgaanilist ainet mullast nõrgunud vees 10 cm sügavusel väetatud alal, kus 7 päeva jooksul orgaanilise aine bioloogiliseks oksüdeerumiseks kuluv hapniku mass (BHT<sub>7</sub>) oli keskmiselt 4 mgO/l. Väetamata alal oli see ligi poolteist korda madalam, keskmiselt 2,7 mgO/l (joonis 5). 40 cm sügavusele mullast nõrgunud vees väetamata alal oli BHT<sub>7</sub> keskmiselt kõrgem (2,1 mgO/l) kui väetatud alal (1,7 mgO/l).

### Puidu produktiooni mõjutavad tegurid

Pajuistanduse aastast juurdekasvu mõjutavad mitmed tegurid – kasutatav paju liik ja kloon, mullastik, kliima, istanduse vanus. Juurdekasvu võivad vähendada mitmesugused haigused ja parasiidid [11].

Pajude juurdekasv sõltub suurel määral mulla omadustest. Kergema lõimiseiga muldadel on juurdekasv olnud madalam kui savikatel muldadel. Savikad mullad hoiavad vett paremini kui liivad. Kui liivakatel muldadel oleks vett piisavalt, oleks ka juurdekasv suurem [1]. Enamasti ongi vesi peamiseks kasvu limiteerivaks teguriks [2; 4; 11]. Paju evapotranspiratsioon on kahekordne võrreldes näiteks hariliku kuuse ja harilik männiga [12].

Uuringus jäi puidu biomass klooni 78112 väetatud alal kaks korda väiksemaks kui väetamata alal. Katsed eelnimetatud klooni Saare istanduses Jõgevamaal on näidanud, et väetamine siiski mõjub antud klooni biomassi suurendavalt [4]. 2002. a uurimuse tulemusena Saarel mõjus klooni 78112 väetamine puidu biomassi neli korda suurendavalt võrreldes väetamata alaga [13]. Tahvanainen ja Rytöneni andmeil uuringud Soomes näitasid, et klooni 78112 osutusid sobivaimaks liivakad mullad [18].

Seega võib klooni 78112 reovee jääkmudaga töödeldud ala väiksem puidu biomass võrreldes väetamata alaga käesolevas uuringus sõltuda kasvukohast tulenevatest iseärasustest. Pajuistanduse saagikust saab suurendada valides kohalikesse oludesse sobivad kloonid. Erinevused puidu biomassi

produktisioonis *S. viminalis* kloonide ja istanduste vahel võivad olla kümnekordsed [18].

Kasvukohast tulenevad iseärasused võisid mõjutada ka kloon 78021 saadud tulemust. Saare katses oli nimetatud kloonil puidu biomass väetatud alal väiksem kui väetamata alal [13], seevastu Nõos suurendas väetamine antud kloonil biomassi 30%. Selleks, et kindlaks teha kloonidele 78112 ja 78021 sobivad kasvutingimused, võiks tulevikus kasvatada nende taimi erinevatel muldadel.

Reovee jääkmudaga väetamine suurendas kloonil 82007 puidu biomassi 20% võrra. 2002. aasta uuringus Saarel saadi nimetatud kloonil väetamise tulemusena puidu biomassi juurdekasv 30% võrra suurem [13]. Varasemates töödes ei ole väetamine kloonil 82007 puidu biomassi suurendanud, vaid on jäänud samaks, võrreldes väetamata alaga [4]. Eelpooltoodut arvestades ei ole otstarbekas kloonil 82007 väetada, kuna väetiste lisamine mulda ei ole oluliselt suurendanud puidu biomassi.

Paju liigid ja kloonid on erinevad oma külmakindluse ning sellele järgneva taastumisvõime poolest [28]. Juhuslikud kevadised hiliskülmad võivad oluliselt vähendada istanduse produktisiooni. Külmakahjustustega puud on keskmiselt madalamad kahjustamata puudest. Kõige ohustatumad on mahalõigatud pajude kändudest kasvavad noored võrsed ning äsja rajatud istandus [26]. Öine külm 4. juunil, 1993.a. põhjustas Rootsis, Hallandis (*Salix viminalis* ja *Salix dasyclados*) uuritud liikide taimedel erinevaid kahjustusi. Näiteks *Salix viminalis* kloonidel 78112, 78183 kahjustusid võrsed (nekroos) vähem kui 50 cm ulatuses. Rohkem kui 50 cm pikkune nekroos täheldati kloonide 78195 (*S. viminalis*) ja 81090 (*S. dasyclados*) võrsetel. Mitmete teiste kloonidele (näiteks 831901, 833002) ei mõjunud see külm öö kahjustavalt. Kloonil 78112 vähendas külm sama aasta juurdekasvu 60%, samas veelgi tugevamalt kahjustada saanud kloonil 78195 vähenes juurdekasv 47% [28]. Uuringud näitavad, et pajude külmakindlus sõltub toitainete tasakaalust muldas [28]. Taimed, mille kudede lämmastiksisaldus on kõrge, hakkavad kasvama keskmiselt nädala võrra varem ning kasvavad sügisel kaks nädalat kauem madalama lämmastiksisaldusega taimedest [29], seetõttu on ka kevadise hilis- ja varase sügiskülma oht suurem.

Käesolevas töös oli kloonidel 78195 ning 81090 puidu biomass mitmekordselt madalam võrreldes saagikamate kloonidega. Sellise tulemuse üheks põhjuseks võiski olla nende vähenenud külmataluvus. Lisaks eelpool nimetatule oli kloonil 81090 ka okste suremus suur võrreldes teiste kloonidega (visuaalsel vaatlusel). Mõningane okste suremus istanduse rotatsiooniperioodi jooksul on loomulik nähtus kõikidel pajukloonidel [25]. Samas suurendavad kevadised hiliskülmad oluliselt okste suremust [27].

Väetamine suurendas puidu biomassi mitmeid kordi võrreldes kontrollaladega kloonidel 78101 ja 78183 (vastavalt 2,4 ja 3,5 korda). Aastaseks juurdekasvuks oli keskmiselt 12 t/ha üheaastaste võrsetega kloonil 78183. Erinevad autorid on näidanud, et istanduse rotatsiooniperioodi esimestel aastatel on puidu aastane juurdekasv väiksem, hiljem see suureneb. Kloonil 78101 saadi aastaseks juurdekasvuks keskmiselt 17,3 t/ha. Eelnimetatud puidu aastased juurdekasvud sarnanevad Lõuna-Rootsis [12] ja Soomes [18] teostatud uuringute tulemustega. Lindrothi ja Bathi andmetel limiteerib edasist produktisiooni tõusu vee kättesaadavus [12]. Kasvuperioodil on Lõuna-Rootsis sademeid 350...550 mm. Kesk-Eestis keskmiselt 420 mm [4]. Seega, kloonide 78183 ja 78101 saadud puidu biomassid on maksimumi lähedal ning väetise hulga suurendamine oluliselt puidu biomassi ei suurenda. Lähtudes eelnevatest andmetest on kloonid 78101 ja 78183 väetamise tingimustes parimad ning seetõttu laiemaks kasutamiseks sobivaimad.

### Raskmetallide sisaldus reovee jääkmudas

Raskmetallide sisaldused reovee jääkmudas olid väiksemad lubatud piirväärtustest, mis on sätestatud reoveesette kõrvalkasutuse nõuetes (tabel 1) [17]. Näiteks elavhõbeda sisaldus uuringus kasutatud reovee jääkmudas oli 1,2 mg/kg kuivaines, mis on lubatust (16 mg/kg kuivaines) mitmeid kordi

väiksem. Plii sisalduse lubatud piirväärtuseks reovee jääkmuda kõrvalkasutuses on 750 mg/kg kuivaines, käesolevas uuringus kasutatud mudas oli see vaid 43 mg/kg kuivaines.

### Ainete väljakanne 10 ja 40 cm sügavusele mullavette

Lämmastiku väljakanne erinevatele sügavustele mullast nõrgunud vette, nii väetamata kui väetatud alal, ei ületanud määruks sätestatud lubatud piiri (15...25 mg/l) [5].

Orgaanilist ainet leidsus erinevatele sügavustele mullast nõrgunud vees väetatud ja väetamata alal lubatud piirnormist ( $BHT_7 = 15...25 \text{ mgO/l}$ ) vähem. Suurim hapniku kogus, mis kulub 7 päeva jooksul 1 liitri nõrgvee orgaanilise aine bioloogiliseks oksüdeerumiseks oli 4 mg, mis on üle kolme korra madalam lubatud piirnormist.

Fosforit leostus mullast 10 cm sügavusele nõrgunud vette eelpoolnimetatud määruks lubatud piirnormist (1,5-2 mg/l) rohkem. Väetamata alal ületas fosfori sisaldus mullast nõrgunud vees lubatud väärtust 0,5 mg/l ning väetamata alal 0,1 mg/l võrra. Sügavamale (40 cm) nõrgunud vees ei ületanud fosfori sisaldus piirnormi, väetatud alal oli see 0,6 mg/l ja väetamata alal 0,4 mg/l.

Kokkuvõttes võib lüsimetritest saadud veeproovide tulemustest järeldada, et 40 cm sügavusele mullast nõrgunud vette leostunud lämmastiku, fosfori ja orgaanika sisaldus ei ületanud heitvee veekogusse ja pinnasesse juhtimise määruks lubatud piirnorme. Siiski tuleb mainida, et suuremate üldistuste tegemiseks oli antud töös veeproovid võetud liiga vähestest kohtadest (ainult 2 nii väetatud kui väetamata alalt). Samuti võeti proove liiga harva. Viimane asjaolu oli põhjustatud suhteliselt sademevaese aasta poolt – mullast läbinõrguva vee kogus  $0,6 \text{ m}^2$  oli nii väike, et ei võimaldanud keemilisteks analüüsideks vajaliku veekoguse kogumist lühema ajaperioodi jooksul. Seetõttu lisati laboris proovidele sageli vett, mis põhjustas niigi väikeste ainete kontsentratsioonide madaldumist ning aparatuuri mõõtevea piiri peal olevaid tulemusi. Seetõttu jääb ka ebaselgeks, mis võis põhjustada väetamata alal suurema fosfori sisalduse 10 cm sügavusele nõrgunud mullavees kui väetatud alal. Eelnevast lähtudes tuleks jätkata uuringuid ainete leostumisest mullast nõrgunud vette, et saada objektiivsemaid tulemusi.

### Kokkuvõte

Eksperimendis kasutati seitset kloonil pajuliikidest *Salix viminalis* ja *Salix dasyclados*. Umbes pool iga kloonil kasvualast väetati reovee jääkmudaga.

Töös kasutatud paju kloonide produktsioon oli väga erinev, väetamine reovee jääkmudaga enamasti suurendas puidu biomassi. Kõige rohkem (70%) tõstis väetamine taimede keskmist kuivmassi kloonil 78183. Oluliselt mõjus väetamine ka kloonil 78101, kus väetamata alal oli keskmine kuivmass 2,4 korda kõrgem kui väetatud alal. Et kindlaks teha kloonidele sobivad kasvutingimused, võiks tulevikus kasvatada taimi erinevatel muldadel, sest käesolevas uuringus erinesid antud kloonide juurdekasvud kirjanduses toodud andmeist.

Mõnedel kloonidel (78101 ja 78183) tõstis reovee jääkmudaga väetamine puidu juurdekasvu mitmeid kordi. Seega on need kloonid sobivaimad väetamise tingimustes kasvatamiseks. Seevastu kloonil 82007 ei ole otstarbekas väetada, sest reovee jääkmuda lisamine mulda suurendas vaid 20% puidu biomassi. Kloone 81090 ja 78195 võiks kasvatada väiksema öökülmaohuga piirkondades.


Raskmetallide sisaldused reovee jääkmudas olid väiksemad lubatud piirväärtustest, mida sätestab *Reoveesette põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise eeskiri*. Lämmastiku ning orgaanilise aine väljakanne erinevatele sügavustele (10 ja 40 cm) mullast nõrgunud vette nii väetatud kui



väetamata alal ei ületanud lubatud piiri, mis on sätestatud määruses *Heitvee veekogusse või pinnasesse juhtimise kord* [5]. Fosforit leostus mullast 10 cm sügavusele nõrgunud vette eelpoolnimetatud määruses lubatud piirnormist rohkem, kuid 40 cm sügavusel jäi see lubatud piiridesse. Leiti, et antud töös oli proovide kordusi objektiivsete tulemuste saamiseks vähe. Seetõttu tuleks jätkata uuringuid ainete leostumisest mullast nõrgunud vette.

## Kirjandus

1. Aliksson, B. (1998) Impact of soil texture on nutrient uptake by rain-fed willow plantations. In: Perttu, K.; Obarska-Pempkowiak, H. (ed.-s) *Sewage treatment by means of pine, willow, reed, and grass vegetation filters*.
2. Hasselgren, K. (1998) Use of municipal waste products in energy forestry: highlights from 15 years of experience. *Biomass and Bioenergy*. 15. 1.
3. Heinsoo, K.; Sild, E.; Koppel, A. (2001) Pajuistandused energiaallikana ja vegetatsioonifiltrina. Tiit, V. (toim.) *Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine*. Teise konverentsi kogumik.
4. Heinsoo, K.; Sild, E.; Koppel, A. (2002) Estimation of shoot biomass productivity in Estonian *Salix* plantations. *Forest Ecology and Management*. 170.
5. Heitvee veekogusse või pinnasesse juhtimise kord (2001) RT I, 69, 424.
6. Koppel, A.; Perttu, K.; Ross, J. (1996) Estonian energy forest plantations – General information. In: Perttu, K.; Koppel, A. (ed.-s) *Short rotation Willow Coppice for Renewable Energy and Improved Environment*.
7. Krall, H.; Viljasoo, L. (1965) Eestis kasvavad pajud. *Abiks loodusvaatlejale*, 51. ENSV TA Loodusuurijate Selts, Tartu.
8. Laas, E. (1987) Dendroloogia. Valgus, Tallinn.
9. Labrecque, M.; Teodorescu, T. I.; Daigle, S. (1997) Biomass productivity and wood energy of *Salix* species after 2 years growth in sric fertilized with wastewater sludge. *Biomass and Bioenergy*. 12. 6.
10. Ledin, S. (1998) Environmental consequences when growing short rotation forests in Sweden. *Biomass and Bioenergy*. 15. 1.
11. Ledin, S. (1996) Soil characteristics and production potential of willow on farmland. In: Perttu, K.; Koppel, A. (ed.-s) *Short rotation Willow Coppice for Renewable Energy and Improved Environment*.
12. Lindroth, A.; Bath, A. (1999) Assesment of regional willow coppice yield in Sweden on basis of water availability. *Forest Ecology and Management*.
13. Matt, K. (2003) Pajude (*Salix viminalis*, *Salix dasyclados*) puidu biomassi produktsioon Eestis. Harjutustöö. TÜ. Botaanika ja Ökoloogia Intituut. Rakendusökoloogia õppetool.
14. Niklus, I.; Rosenvald, R. (1999) Arukase kultiveerimise tulemustest endistel põllumaadel. *Eesti Mets*, 7.
15. Perttu, K. L. (1999) Environmental and hygienic aspects of willow coppice in Sweden. *Biomass and Bioenergy*. 16.
16. Sennerby-Forsse, L.; Johansson, H. (1993) Energiavõsa väike käsiraamat. Eesti TA Zooloogia ja Botaanika Instituut, Tartu.
17. Reoveesette põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise nõuded (2003) RTL 10.01. 5, 48.

- 
18. Tahvanainen, L.; Rytönen, V.-M. (1998) Biomass production of *Salix viminalis* in southern Finland and the effect of soil properties and climate conditions on its production and survival. *Biomass and Bioenergy*, 16.
  19. Tamm, Ü. (2003) Hübriidhaab – armastus ja hirmud. *Eesti Mets*, 1.
  20. Tullus, H.; Uri, V.; Lõhmus, K.; Mander, Ü.; Keedus, K. (1998) Halli lepa majandamine ja ökoloogia. Paar, Tartu.
  21. Uri, V. (2000) Hall ja hübriidlepp – energiametsa puuliigid? Kari, I.; Jõgiste, K. (koost.-d) *Metsandusteaduskonna magistrantide ja doktorantide teaduslike tööde kogumik*. EPMÜ Metsandusteaduskonna toimetised, 33.
  22. Uri, V. (2000) Halli ja hübriidlepa kultuurid endisel põllumaal ja nende biomassi produktsioon. *Metsanduslikud uurimused XXXII*.
  23. Vares, A. (1999) Peamised toitained (NPK) ja biomass 20 aastases sanglepa-katsekultuuris. *Metsanduslikud uurimused XXXI*.
  24. Vares, A.; Tullus, A.; Raudoja, A. (2003) Hübriidhaab, ökoloogia ja majandamine. Triip, Tartu.
  25. Verwijst, T. (1996) Stool mortality and development of a competitive hierarchy in a *Salix viminalis* coppice system. *Biomass and bioenergy*, 10. 5/6.
  26. Verwijst, T.; Elowson, S.; Li, X.; Leng, G. (1996) Production losses due to a summer frost in a *Salix viminalis* short-rotation forest in Southern Sweden. *Scand. J. For. Res.* 11.
  27. von Fircks, H. A. (1992) Frost hardiness of dormant *Salix* shoots. *Scand. J. For. Res.* 7.
  28. von Fircks, H. (1996) Impact of abiotic factors on frost resistance and cold acclimation in *Salix* species and clones. In: Perttu, K.; Obarska-Pempkowiak, H. (ed.-s) *Sewage treatment by means of pine, willow, reed, and grass vegetation filters*.
  29. von Fircks, Y.; Ericsson, T.; Sennerby-Forsse, L. (2001) Seasonal variation of macronutrients in leaves, stems and roots of *Salix dasyclados* Wimm. grown at two nutrient levels. *Biomass and Bioenergy*, 21.
  30. Lantmännen Agroenergi (2006) homepage. URL: [www.agrobransle.se](http://www.agrobransle.se) [25.10.2007]

# Pelletipõletuskatla PELLE soojustehniliste karakteristikute määramine

Kristjan Plamus

Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituut

Viimastel aastatel on biokütuste kasutamine pidevalt laienenud. Kaasaegsed biokütuste tootmis- ja põletustehnoloogiad võimaldavad efektiivselt ära kasutada praktiliselt kõiki metsa- ja puidutööstuse jäätmeid. Üheks selliseks puidutööstuse jäätmetest valmistatud kütuseks on puitpelletid, mida on võimalik vastavate põletusseadmete olemasolul väga edukalt kasutada ühepereelamute kütmiseks.

TÜTÜ Soojustehnika Instituudi (STI) ja Viljandi Metall AS koostööna on välja töötatud originaalkonstruksiooniga puitpelletite põletamiseks mõeldud keskküttekatel STI20VTP, tootenimetusega **Pelle**. Projekti toetas rahaliselt Sihtasutus EAS.

Pelle katla väljatöötamisel olid aluseks Eesti Vabariigis välja antud kasuliku mudeli tunnistused: *Kumerate torulaudadega leek-suitsutorukatel ja Katla suitsutoru turbulaator*.

Käesolevas töös käsitletakse katla Pelle soojustehnilisi karakteristikuid. Eesmärgiks oli läbi viia katla mitmekülgne soojustehniline katsetamine ja katla käitusnäitajate vastavuse kindlaksmääramine euronormatiividele. Katsetuste käigus püüti välja selgitada katla võimalikud vead ja esitada tootjale ettepanekud ilmnenud vigade kõrvaldamiseks ning võimalike muudatuste tegemiseks selle konstruksioonis.

Katsed toimusid Eesti standardi EVS-EN 303-5:2001 järgi. Standard määrab käsitsi või mehaanilise pealeandmisega tahkekütuse katelde soojusliku nimivõimsusega kuni 300 kW terminoloogia ja katsetamise läbiviimise nõuded.

## Katsetatav keskküttekatel PELLE

Eesti turul enim müüdavaks pelletikatlaks on STI poolt välja töötatud katel PELLE. Katel on konstrueeritud töötamiseks puitpelletite, kuid vajadusel ka kerge kütteõli põletiga. Katel sobib väiksema ja keskmise suurusega eramu kütteks ning sooja tarbevee tootmiseks. Tarbevee ettevalmistamiseks on katla mahutisse paigaldatud vasest spiraalne soojusvaheti või lisatud eraldi mahtboiler. Ette on nähtud ka 6...9 kW elektriküttekehade paigaldamise võimalus. Viimane suurendab vajaduse tekkel talvise eriti külma ilmaga katla võimsust või rahuldab suvist tarbevee vajadust. Pelle põhiparameetrid on järgmised:

- Nimivõimsus (puitpelletid, kerge kütteõli) 20 kW;
- Täiendav elektriküttekeha 6...9 kW;
- Töörõhk 2 baari;
- Maksimaalne väljuva vee temperatuur 90 °C;
- Katla veemaht 0,165 m<sup>3</sup>;
- Katla tühi mass 150 kg.

Katla valmistamisel kasutatakse kumeraid torulaudu, mis võimaldab selle soojusvahetuspinnad ümarelelementidena kujundada, vähendades nende seina paksust ja vältides ankurdamist. Kõrge kasuteguri saavutamiseks on erilist tähelepanu pööratud katla konvektiivosa kujundusele. Nimelt kasutatakse katla suitsu- ehk konvektiivtorudes turbulaatoreid, mis neis järsult soojusvahetust intensiivistavad. Mõlemad nimetatud meetmed tõstavad katla soojuslikku efektiivsust, suurendavad

konstruktsiooni kompaktsust, vähendavad katla massi ja võimaldavad kokku hoida kulutusi selle valmistamisel. Kesküktekatel Pelle on kujutatud joonisel 1.

Kuna katel on ette nähtud töötama loomuliku tõmbega, mis sõltub paraku olemasoleva korstna kõrgusest, on välja töötatud võimalikult väikese aerodünaamilise takistusega turbulaatori konstruktsioon (joonis 1; tähis 4).

Turbulaator koosneb ühe millimeetri paksusest keerdu keeratud laiast metall-lindist ja selle ümber keeratud ühest või kahest kitsamast lindist. Sõltuvalt keerdude sammu pikkusest (L) ja välimiste lintide arvust (üks või kaks), valmistatakse nelja erineva aerodünaamilise takistusega turbulaatoreid. Siinkohal tuleb arvestada, et mida suurem on turbulaatori number (1...4) seda suurem on aerodünaamiline takistus, mis samas tagab aga intensiivsema soojusülekanne ja katla suurema kasuteguri.

### PELLE katsetamisel kasutatud seadmed ja teostatud mõõtmised

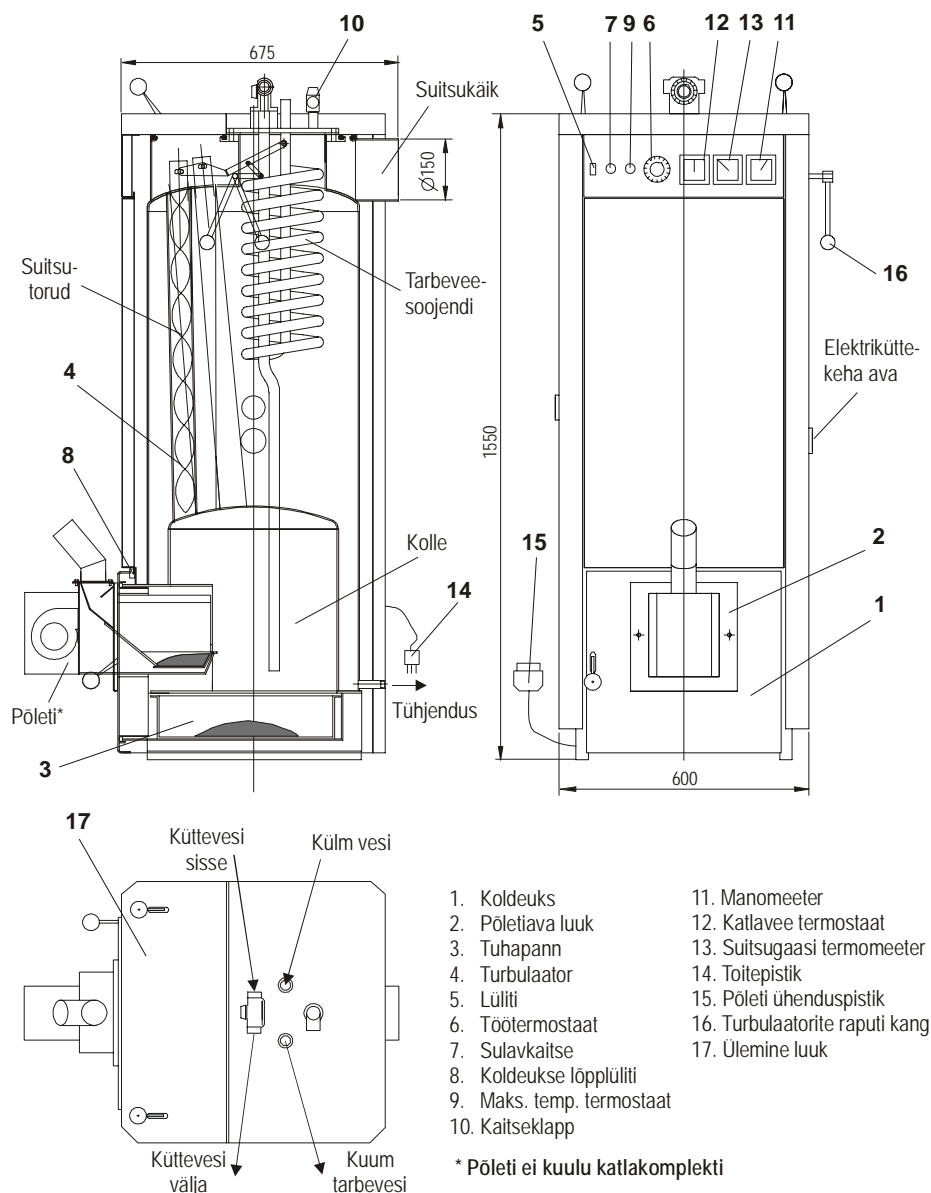
Katel seati soojustehniliste bilansi katsetusteks üles STI katelde laboris, kus see ühendati 15 meetri kõrguse korstnaga ja hoone küttesüsteemiga. Katsetel puitpelletitega kasutati 30 kW pelletipõletit IWABO Fastighet koos pelletite etteande-tigutransportööri ja AS Viljandi Metall poolt valmistatud kütusemahutiga.

Katla Pelle bilansikatsetel mõõdetud parameetrid ja kasutatud mõõteseadmed on toodud tabelis 1. Põhimõtteline mõõtekohtade paiknemine on näidatud joonisel 2.

**Tabel 1.** Katsetel mõõdetud parameetrid ja mõõteseadmed

Nr	Parameeter	Mõõteriist
1	Katlasse siseneva vee temperatuur	Aquarius-2000 koos arvutiliidesega
2	Katlast väljuva vee temperatuur	Aquarius-2000 koos arvutiliidesega
3	Vee kulu läbi katla	Aquarius-2000 koos arvutiliidesega
4	Siseneva tarbevee temperatuur	Omega-liides
5	Tarbevee temperatuur katlast väljumisel	Omega-liides
6	Tarbevee temperatuur peale termostaati	Omega-liides
7	Tarbevee kulu	Tiivik-veemõõtja
8	Koldest väljuva suitsugaasi temperatuur	Omega-liides
9	Katlast lahkuva suitsugaasi temperatuur	Omega-liides
10	Hõrendus katla koldes	Omega-liides
11	Hõrendus katla taga (korstnajas)	Omega-liides
12	Lahkuvgaasi koostis O <sub>2</sub> (%) ja CO(ppm)	STI statsionaarsete saasteallikate põlemisgaaside mõõtekompleks
13	Katla vee temperatuur andurite tasemel	Omega-liides
14	Kütuse kulu mõõtmine puitpelletite põletamisel	Elektrooniline kaal (max 300 kg)

Termopaaridena kasutati omavalmistatud ja tööstuslikke K-tüüpi termopaare, kusjuures kolde lõpus temperatuuri mõõtmiseks oli termopaar ekraneeritud. Hõrenduse mõõtmiseks kasutati *Honeywell 160PC* tüüpi sisseehitatud võimendiga diferentsiaalandureid. Nimetatud mõõteandurite signaale konverteeris, näitas ja salvestas 16-kanaliline *Omega data-logger*. *Aquariuse* temperatuurianduritena kasutati takistustermomeetreid ning kuluandurina tiivik-veemõõtjat koos impulsilugejaga. Katla välispinna temperatuure mõõdeti radiatsioonpüromeetriga *SEFRAM 9873*, hinnates katla värvitud välispinna mustusastmeks 0,85. Pelletite põletamisel määrati kütuse kulu pelletite kaalumiseiga katsete ajal (pelletid koos kütusemahutiga olid asetatud elektroonilisele kaalule). Katel ühendati hoone küttesüsteemiga neliksegisti (15, joonisel 2) kaudu nõutava veetemperatuuri kindlustamiseks.



**Joonis 1.** Keskküttekatla PELLE chitus

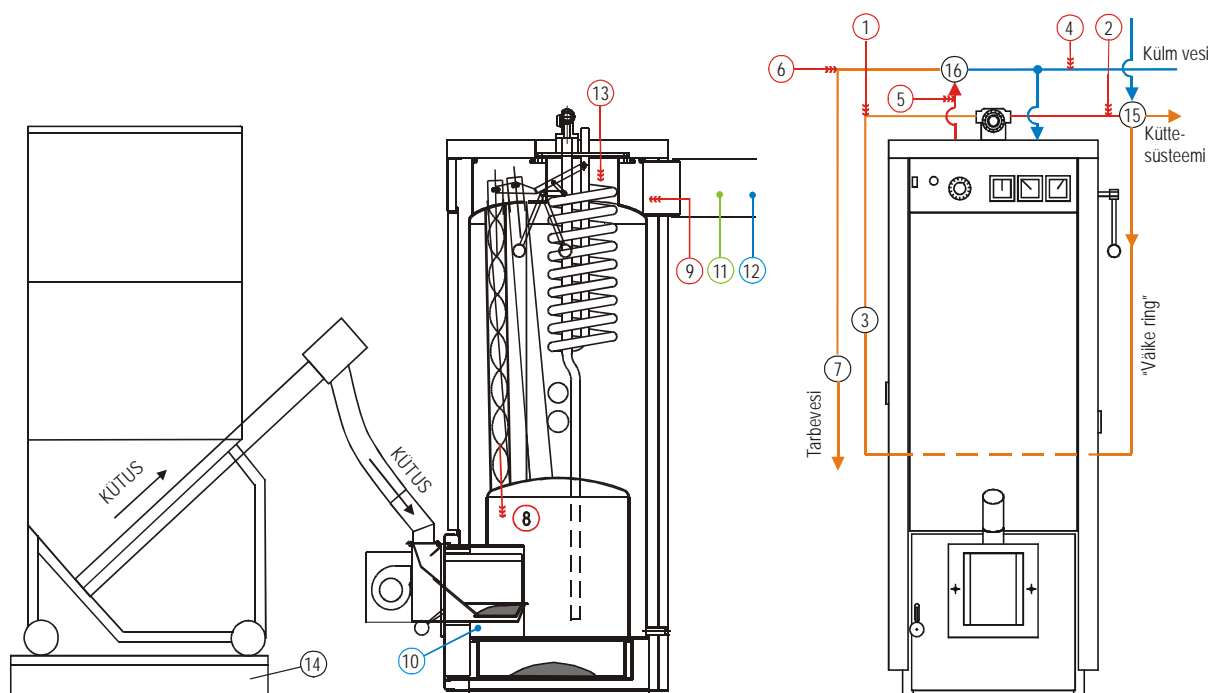
### Katla katsetamise tulemused

Järgnevalt on toodud katla Pelle soojustehniliste katsetuste tulemused puitpelletite põletamisel (nr 2 ja nr 4 turbulaatoritega). Välja on toodud katla kasulik võimsus, kasutegur ja soojuskadod katla erinevatel töörežiimidel.

Katsete käigus uuriti ka katla konvektiivosa aerodünaamilist takistust erinevatel võimsustel. Samuti on toodud ülevaade lahkuva gaasi koostise ( $\text{CO}$  ja  $\text{O}_2$ ) ja katla mitmesuguste töötemperatuuride kohta. Katla katsetamise käigus pöörati tähelepanu ka selle tööd häirivate asjaolude väljaselgitamisele, eriti pelletite restil püsimise osas.

Katla üheks tähtsamaks tehnilis-ökonomiliseks näitajaks on selle kasutegur ( $\eta$ ), mis näitab katla poolt veele antava ja kütuse põlemisel vabanenud soojushulga suhet. Katla kasutegur on paratamatute soojuskadude tõttu alati väiksem kui 1 ( $\eta < 1$ ) ning sõltub eelkõige katla konstruktsiooni

täiuslikkusest (küttepinna kujundus – saavutamaks võimalikult head soojusülekannet, soojusisolatsiooni kvaliteet jne), põleti efektiivsusest ja kasutatava kütuse kvaliteedist.



**Joonis 2.** PELLE ühendamise ja mõõteskeem: 1. katlasse siseneva vee temperatuur; 2. katlast väljuva vee temperatuur; 3. vee kulu läbi katla 4. siseneva tarbevee temperatuur; 5. tarbevee temperatuur katlast väljumisel; 6. tarbevee temperatuur pärast termostaati; 7. tarbevee kulu; 8. koldest väljuva suitsugaasi temperatuur; 9. katlast lahkuva suitsugaasi temperatuur; 10. hõrendus koldest; 11. hõrendus katla taga; 12. lahkuva gaasi koostis; 13. katla vee temperatuur; 14. kütuse kulu; 15. neliksegi; 16. termostaat. Kütuse põlemisel katlas vabanenud soojushulga jagunemist kasulikuks soojuseks ja mitmesugusteks soojuskadudeks näitab katla soojusbilanss. Katla soojusbilanss, koostatuna tarbitava kütuse massiühiku (1 kg) kohta, näeb välja järgmine:

$$Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad kJ / kg \quad (1)$$

kus  $Q_k$  – kütuse tarbimisaine alumine kütteväärtus;  
 $Q_1$  – katlas kütteele antud soojushulk (ehk kasulik soojus);  
 $Q_2$  – soojuskadu katlast lahkuva suitsugaasiga;  
 $Q_3$  – soojuskadu kütuse keemiliselt mittetäielikust põlemisest;  
 $Q_4$  – soojuskadu kütuse mehaaniliselt mittetäielikust põlemisest;  
 $Q_5$  – soojuskadu katla välisjahtumisest;  
 $Q_6$  – soojuskadu koldest eemaldatava tuha ja räbu füüsikalise soojusega

Soojuskadu koldest eemaldatava tuha ja räbu füüsikalise soojusega Pelle katlal puudub. Teatud praktilistel kaalutlustel on soojusbilanss otstarbekas avaldada suhteliste (%) suuruste kaudu järgmiselt:

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 \quad \% \quad (2)$$

Katsetel puitpelletitega kasutati AS Kalvi Mõis toodetud heledaid pelletideid. Labori analüüsi andmed kasutatud pelletite tarbimisaine kohta on toodud tabelis 2. Puitpelletite keemilised analüüsid teostati STI keemialaboris.

**Tabel 2.** Katsetatud puitpelletite omadused

Pelleti tüüp	Kütteväärtus MJ/kg	Tuhasus %	Tihedus kg/m <sup>3</sup>	Niiskus (katsete ajal) %
Puitpellet	17,41	0,5	617	7,0

Puitpelletiteks nimetatakse vääristatud puitkütust, mis on saadud kuivatatud ja peenestatud puidujäätmeid kõrge rõhu all kokku pressides. Tihedate silindrikujuliste pulkade läbimõõt on tavaliselt 6...12 mm. Pelletite niiskus on väike (8...10%) ning kütteväärtus suur 16.560...18.000 MJ/t. Ühe tonni pelletite ruumala on umbes 1,5 m<sup>3</sup> ning sellise koguse energiasisaldus võrdub umbes 0,5 tonni kerge kütteõli või 4...5 kuupmeetri küttepuude omaga.

## Põletuskatsed turbulaatoritega nr 2

Nendel katsetel kasutati kuut turbulaatorit nr 2 ja ühte nr 4 (keskmise, millele kinnitus kolde temperatuuri mõõtmise termopaar). Katsed teostati erinevatel põleti töörežiimidel, mis ühtlasi võimaldas hinnata katla parameetrite käitumist erinevate võimsuste korral. Bilansikatsete tulemused on toodud tabelis 3, kust nähtub, et üsna kõrge kasutegur saavutati ilmselt tänu kolde suurele pinnale ja ka turbulaatorite efektiivsusele.

Maksimaalne katla kasulik võimsus saavutati põleti režiimil 180/180, mis oli ühtlasi põleti maksimaalne tootlikkus, mille korral etteande-tigu pidevalt töötas. Etteande-teo (kütusemahuti tigu) tootlikkuse suurendamiseks kallutati kütuse konteinerit, et selle kallet vähendada. Selline lahendus vähendab gravitatsioonijõu mõju kütuse etteande-teo tootlikkusele.

Järgnevatel tabelites on kasutatud tähised:

$V_{\text{vesi}}$  – vee mahtkulu, m<sup>3</sup>/h;

$Q$  – katla kasulik võimsus, kW;

$T_{\text{lah}}$  – katlast lahkuva suitsugaasi temperatuur, °C;

$T_{\text{kol}}$  – gaasi temperatuur kolde lõpus (sisenemisel konvektiivtorudesse), °C;

$T_{\text{kat.vesi}}$  – katlast lahkuva vee temperatuur, °C;

$\Delta P$  – rõhkude (hõrenduste) vahe katlast väljumisel ja koldes ehk katla aerodünaamiline takistus, Pa;

$\eta$  – katla kasutegur, %;

$q_2$  – kadu suitsugaasi füüsikalise soojusega, %;

$q_3$  – kadu keemilisest mittetäielikust põlemisest, %;

$q_4$  – kadu mehaanilisest mittetäielikust põlemisest, %;

$q_5$  – kadu katla välisjahtumisest, %.

**Tabel 3.** Katsed turbulaatoritega nr 2

Põleti	$V_{\text{vesi}}$	$Q$	$O_2$	CO	$T_{\text{lah}}$	$T_{\text{kol}}$	$T_{\text{kat.vesi}}$	$\Delta P$	$\eta$
tsükkel	m <sup>3</sup> /h	kW	%	ppm	°C	°C	°C	Pa	%
Töö/kogu									
100/180	0.96	16.0	9.59	166.5	134	431	67	0.4	91.3
115/180	0.96	26.0	9.11	129.9	184	483	71	7.8	89.0
125/180	0.96	26.5	8.22	145.6	187	501	77	8.0	89.6
180/180	0.96	33.4	8.81	204.7	221	518	75	20.0	87.2

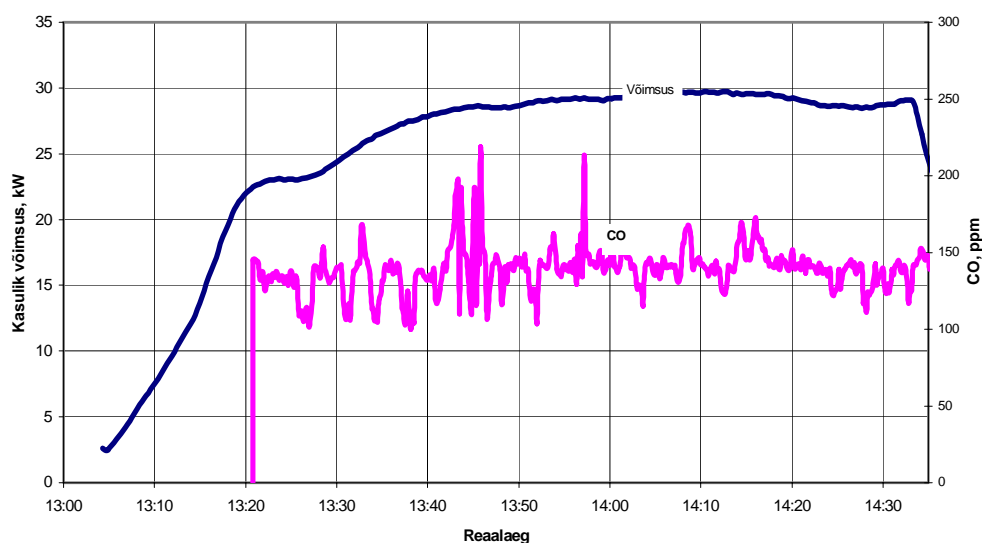
Tabelist 3 on näha, et katla võimsusel 33,4 kW tõuseb lahkuvgaasi temperatuur kuni 221 °C

(normaalne kuni 190 °C), mis tähendab suuremat kadu lahkvuugaasiga. Arvestades asjaolu, et lahkvuugaasi temperatuuri tõus 30 K võrra alandab katla kasutegurit ~2% võrra, ei ole katla töö võimsusel üle 30 kW langenud kasuteguri tõttu otstarbekas. Pelle erinevat liiki soojuskadude kohta saab teha järeldusi tabelis 4 esitatud andmete põhjal.

Kõige suurema soojuskao moodustab soojuskadu lahkvuugaasi füüsikalise soojusega ( $q_2$ ) 8,45% (keskmine) (tabel 4). Kadu katla välisjahtumisest ( $q_5$ ) ei ületa 1,8% ja kadu mehaanilisest mittetäielikust põlemisest ( $q_4$ ) jääb alla 0,5%. Tühiseks võib pidada kadu keemiliselt mittetäielikust põlemisest ( $q_3$ ), mis on maksimaalselt 0,13%.

**Tabel 4.** Katla PELLE soojuskadod nr 2 turbulaatoritega

Põleti	Q	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$
tsükkel	kW	%	%	%	%
100/180	16.0	6.39	0.12	0.37	1.8
115/180	26.0	8.76	0.09	0.37	1.8
125/180	26.5	8.19	0.09	0.37	1.8
180/180	33.4	10.46	0.13	0.37	1.8
	Keskmine:	8.45	0.11	0.37	1.8



**Joonis 3.** Katla PELLE kasuliku võimsuse ja CO emissiooni ajaline sõltuvus.

Emiteeritava CO taseme kohta saab teha järeldusi jooniselt 3. Nähtub, et *IWABO Fastighet* põleti on võimeline andma piisavalt õhku CO põlemiseks, mis on saavutatud sekundaarõhu suunamisega resti kohale. Seda kinnitavad ka tabelis 3 näidatud suhteliselt madalad CO väärtused põleti erinevatel töörežiimidel. Teisalt on madalad CO väärtused saavutatud metallist kaare kasutamisega resti kohal, mis tagab piisava CO põlemistemperatuuri restil põlemistsoonis (joonis 4 a).

Pelletite põletamisel esinesid mõned probleemid seoses nende püsimisega restil ning põlemata pelletite restilt tuhapannile langemisega (vt fotod joonisel 4). Põleti automaatika teostab iga 45 minuti järel resti puhastamistsükli, mille käigus restile kogunenud tuhk puhutakse õhuventilaatori poolt tekitatud õhujoaga tuhapannile. Puhumise käigus kaasatakse restilt ka põlemata või poolpõlenud pelletite väiksemaid tükke.





a) Tuhk pelletipõleti restil

b) Põlemisjääk tuhapannil

**Joonis 4.** Tuhaprobleemid *IWABO Fastighet* pelletipõletil

Restile tekkinud tuhakihi vaatlusel selgus, et tuhakiht oli kergelt paakunud ning selles olid primaarõhu poolt tekitatud kanalid. Laborianalüüsi andmed pelletite põletamisel tekkinud põlemata aine sisalduse kohta põlemisjäägis on toodud tabelis 5.

**Tabel 5.** Põlemata aine sisaldus põlemisjäägis

Katsed	Turbulaatoritega nr 2	Turbulaatoritega nr 4
Tuhk põleti restilt	4,8 %	28,3 %
Kogu tuhapanni sisu	62,6 %	64,3 %

Suur põlemata osa sisalduse erinevus põleti restil võib olla tingitud eelpool mainitud resti automaatsest puhastamisest. Puhastussükli toimumise aega spetsiaalselt ei fikseeritud.

#### Põletuskatsed turbulaatoritega nr 4

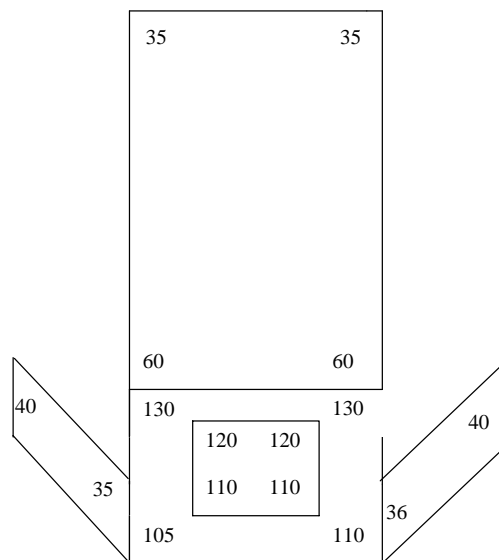
Katsed turbulaatoritega nr 4 toimusid analoogselt eelnevalt kirjeldatuga. Siinkohal kasutati seitset turbulaatorit nr 4. Bilansikatsete tulemused on toodud tabelites 6 ja 7.

**Tabel 6.** Katsed turbulaatoritega nr 4

Põleti	$V_{\text{vesi}}$	Q	$O_2$	CO	$T_{\text{lah}}$	$T_{\text{kol}}$	$T_{\text{kat.vesi}}$	$\Delta P$	h
tsükkel	$m^3/h$	kW	%	ppm	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	Pa	%
Töö/kogu									
80/180	0.97	19.7	8.58	166.5	138	468	64	5.9	92.1
100/180	0.97	23.2	8.44	126.8	157	497	71	10.9	91.2
115/180	0.97	29.1	9.15	144.0	188	534	72	24.5	89.1
120/180	0.97	29.9	9.06	156.4	190	540	72	24.7	89.0
125/180	Režiim ei õnnestunud kuna jäi puudu korstna tõmbest								

**Tabel 7.** Soojuskaod turbulaatoritega nr 4

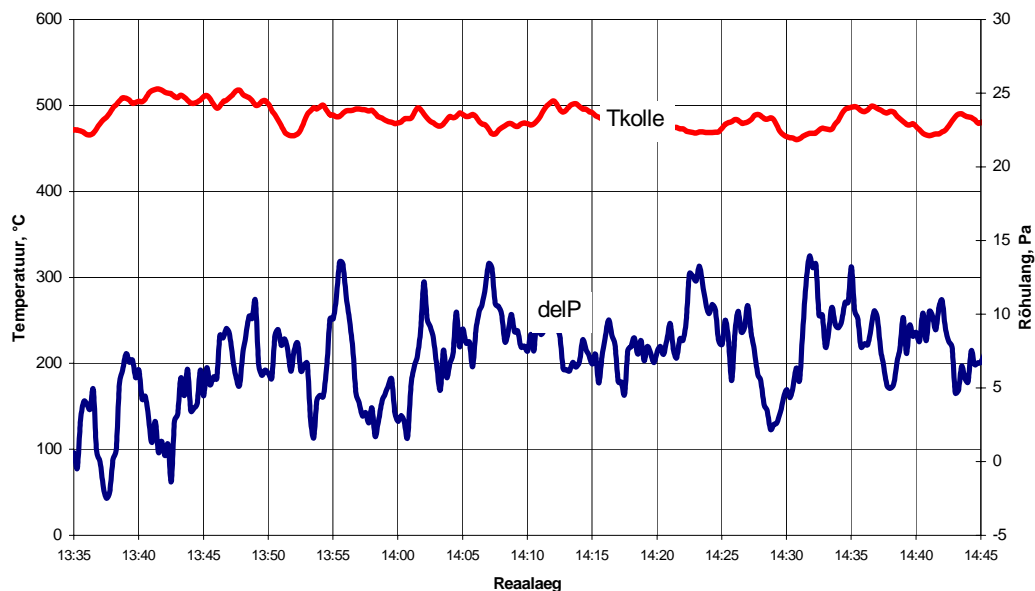
Režiim	Q	q <sub>2</sub>	q <sub>3</sub>	q <sub>4</sub>	q <sub>5</sub>
Tsükkel	kW	%	%	%	%
80/180	19.7	5.99	0.10	0.05	1.8
100/180	23.2	6.89	0.07	0.05	1.8
115/180	29.1	8.99	0.09	0.05	1.8
120/180	29.9	9.03	0.10	0.05	1.8
Keskmine:		7.73	0.09	0.05	1.8

**Joonis 5.** Katla PELLE piirete pinnatemperatuurid °C pelletite põletamisel mõõdetuna võimsusel 33 kW.

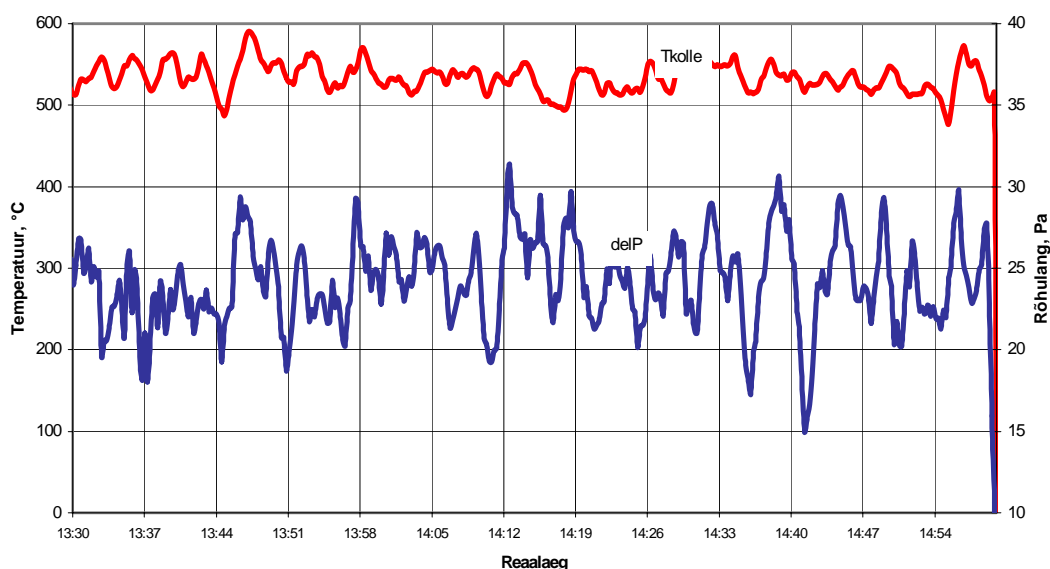
Nagu ka eelnevate katsete puhul, saadi siingi oodatud tulemused. Tabelist 6 nähtub, et katla maksimaalne kasulik võimsus saavutati põleti režiimil 120/180. Edasisel võimsuse suurendamisel jäi korstna tõmbest vajaka, suits tungis koldest pelletite pealejooksu torusse. See oli tingitud turbulaatorite nr 4 suurest aerodünaamilisest takistusest. Vajaliku tõmbe puudumine pani mõtlema katla võimalikule varustamisele tõmbeventilaatoriga. Katla erinevat liiki soojuskadude kohta nr. 4 turbulaatoritega saab teha järeldusi tabelist 7.

Katla pinnatemperatuurid pelletite põletamisel olid samad nii turbulaatorite nr 2 kui ka nr 4 korral. Vastavad andmed on toodud joonisel 5. Tuleb märkida, et ukse temperatuurid osutusid kõrgemaks kui esialgu arvati. Põhjus peitub tõenäoliselt ukse puudulikus isolatsioonis.

**Joonisel 6** on toodud andmed kolde parameetrite käitumise kohta erinevate turbulaatorite korral põleti režiimil 115/180. Põleti samal režiimil arendab katel suuremat võimsust turbulaatoritega nr 4. Sellest ka kõrgem koldetemperatuur, veidi üle 500 °C. Samas on näha ka suuremat rõhulangu, mis on tingitud turbulaatorite nr 4 suuremast takistusest.



**Joonis 6a.** Kolde parameetrite käitumine turbulaatoritega nr 2 põleti režiimil 115/180




**Joonis 6b.** Kolde parameetrite käitumine turbulaatoritega nr 4 põleti režiimil 115/180

## Järeldused

STI-s projekteeritud ja AS-s *Viljandi Metall* valmistatud keskküttekatel PELLE on kõrge soojusliku efektiivsusega ja keskkonnasõbralik. Katsed näitasid, et katel on pelletitega võimeline arendama võimsust kuni 30 kW madalate emissiooninäitude juures (lahkuvgaasi temperatuur alla 200°C ja CO sisaldus alla 200 ppm-i O<sub>2</sub> sisaldusel 8-9,5%).

- kasutegur puitpelletite põletamisel - 90% (Euronormide kohaselt 75%);
- süsinikmonooksiidi kontsentratsioon põlemisgaasis puitpelletite põletamisel ei ületa 200 ppm soojustatud pelletipõleti kasutamisel (Euronormide kohaselt 2400 ppm);
- mehaaniline põlemiskadu puitpelletite põletamisel ei ületa 0,5%.



Katsed näitasid, et pelletite põletamisel emiteeritud CO tase oli madal. Seega sobib Pelle tüüpi katlale sellise konstruktsiooniga pelletipõleti, millel sekundaarõhk suunatakse restipealsesse ruumi, resti katva kaare alla.

STI laboris on olemas uued gaasianalüsaatorid Gasmet 4000T ja FIDAMAT 6, mis võimaldavad määrata suitsugaaside koostist täpsemalt kui antud katsetel kasutatud statsionaarne mõõtekompleks. Lisaks võimaldab FIDAMAT 6 määrata süsivesinike summaarset hulka suitsugaasides arvatuna metaanile.

STI katlalaboris on olemas seadmestik väikekatelde katsetamiseks ning sellele laborile on võimalik taotleda akrediteeritud labori staatust.

# Bioenergiakultuuride kasvatamise võimalused põllumajanduslikust kasutusest väljajäänud maal Ida-Viru, Järva ja Tartu maakondades

Liia Kukk

Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituut

Käeoleva uurimuse eesmärgiks oli tuvastada Tartu, Järva ja Ida-Viru maakonnas kasutamata põllumajandusmaad ja määrata nende kasutussobivus ning potentsiaalne energiaproduktioon bioenergiakultuuride kasvatamisel. Kasutusest väljasoleva maa pindala leidmisel lähtuti Põllumajanduse Registrite ja Informatsiooni Ameti 2004. aasta taotletud toetuste kaardikihtidest, mullastiku analüüsimisel kasutati Maa-ameti digitaalseid mullastikukaarte. Muldade omadustest lähtuvalt analüüsiti kasutamata põllumajandusmaade kasutussobivust nii energiavõsa kui energiaheintaimede kasvatamisel. Tulemus võimaldab hinnata potentsiaalset bioenergia toodangut Tartu, Järva ja Ida-Viru maakondades, mida on võimalik rakendada biomassi ja bioenergia kasutamise edendamise arengukavade koostamisel.

## Sissejuhatus

Eesti Vabariigi taasiseseisvumise järgselt sattus energiamajandus tõsisesse kriisi. Kivisüsi, kütteõli ja maagaas kallinesid märgatavalt, samas kui Eesti enimkasutatava maavara – põlevkivi – ressursside ammendumist arvatakse kätte jõudvat juba 60 aasta pärast. Energiaprobleemidele hakati lahendusi otsima taastuvenergiaallikatest [20].

Uus kütuse- ja energiamajanduse pikaajaline riiklik arengukava aastani 2015 kinnitati 15. detsembril 2004. Bioenergeetikat käsitletavate strateegiliste eesmärkidena soovitakse aastaks 2010 saavutada taastuvelektri osakaaluks 5,1% ja aastaks 2020 elektri- ja soojuse koostootmisjaamades toodetud elektri osakaaluks 20% brutotarbimisest, samuti töötada välja meetmed, võimaldamaks taastuvate vedelkütuste, eeskätt biodiisli kasutamist transpordisektoris [11]. Lisaks nähakse arengukavas ette bio- ja muude taastuvate kütuste indikatiivse osakaalu tõstmist 2011. aastaks 5,75%-ni transpordi tarbeks rakendatavast kütusest [18].

Taasiseseisvumise algusaastate 1,1 miljonist hektarist haritavast maast on 2005. aasta statistika järgi kasutusel 561 tuhat hektarit. Mahajäetud maad paratamatult võsastuvad. Teatud osa kasutamata maid oleks otstarbekas kasutada biomassienergia tootmiseks [4].

Tartu maakonnas moodustas 2005. aastal haritav maa 53,6 tuhat hektarit [4]. Seega on taasiseseisvumisjärgse ajaga võrreldes kasutusel vaid pool endisest põllumaast. Ulatuslikum põllumajanduse hääbumine on toimunud Kambja, Meeksi, Peipsiääre ja Alatskivi vallas. 50...70% ulatuses on endist maad kasutuses Rõngu, Konguta, Nõo, Ülenurme, Mäksa ning Laeva vallas. Tartu, Luunja, Vara ja Võnnu valdades on kasutusest välja jäänud 50...70% taasiseseisvumisjärgsest põllumaast. Tartumaa väheviljakatel muldadel on haritava maa väljajäämus olnud suurem (70...95%) [2].

Järvamaa endisest 90 tuhandest hektarist haritavast maast on kasutuses 71% ehk 64.050 hektarit [4]. Suurim haritava maa väljajäämus on olnud suhteliselt hea mullaviljakusega (keskmine üle 46 hp) Kareda vallas. Ka Lehtse ja Roosna-Alliku valdades on endisest haritavast maast kasutusel vaid 30...50%. Türi, Imavere, Koigi ja Koeru valdades kasutati 2001. aastal põllumaana kuni 70% 1992. aasta haritavast maast. Ülejäänud valdades on kasutusest väljajäänud maid 30% ulatuses [2].

Ida-Viru maakonnas moodustas 2005. aastal haritav maa veidi üle 13.000 hektari [4]. Alates taasiseseisvumisest on maad kasutusest välja jäänud ligi 70%. Üheksas vallas (kaasaarvatud

Mäetaguse vallas) haritakse põlde vaid kuni 30% ulatuses endisest põllumaast. Rohkem (50...70% ulatuses) on põllumaad kasutusse jäänud Maidla vallas [2].

Viimasel aastakümnel on uurima hakatud biomassikultuuride kasvatamisvõimalusi Eesti tingimustes. Skandinaaviamaade varasemate uuringute põhjal on suure kasvuintensivsuse ja lühikese raieringi tõttu energiavõsakultuurideks soovitud halli leppa, paju ja hübriidhaaba või hariliku haava triploidset vormi. Energiavõsa kasutussobivust olmevee puhastamiseks on põhjalikumalt uuritud Euroopa Komisjoni *Life-Environment* keskkonnaprojekti raames. 2003. aastal valmisid loodussäästlikud reovee puhastamise seadmed Eesti kolmele asulale [5]. Praeguseks on energiametsa katsealadelt kogutud piisavalt teadmisi, rajamaks energiavõsa suurematel põllumajanduslikust kasutusest väljajäänud pindadel.

Heina kasutusvõimalusi energia tootmiseks on maailmas uuritud alates 1980. aastatest [12]. Eesti tingimustesse on kohaldatavad Rootsi ja Soome kogemused. Energiaheina uuringutega on Rootsis tegeletud juba 1970-ndate lõpust, Soomes alates 1990-ndatest [9]. Eestis ei ole rohhtaime energiakultuurina kasvatamist veel palju uuritud [7; 9]. Samas on potentsiaalsete energiaheinaliikidena Eesti tingimustes nimetatud päideroogu (*Phalaroides arundinacea*), ida-kitsehernest (*Galega orientalis*) ja roog-aruheina (*Festuca arundinacea*) [8].

## Materjal ja metoodika

Põllumajanduslikust kasutusest väljas oleva maa suuruse leidmisel on lähtutud Põllumajanduse Registrite ja Informatsiooni Ameti kaardikihtidest ja 2004. aasta toetuste andmebaasidest. Deklareeritud põllumajandusmaa, millele ei taotletud ühtse põllumajanduspoliitika (CAP) raames toetusi, arvestati täielikult kasutusest väljas olevaks. Põllumajandusmaid, kus toetusi ei taotletud 50...99% ulatuses, käsitleti osaliselt kasutamata aladena. Leitud põllumaade mullastikust ülevaate tegemiseks on kasutatud Maa-ameti digitaalset mullastikukaarte. Nende kaardikihtide alusel tehti tarkvarapaketi *MapInfo Professional* põllumassiivide kohta detailne topograafiline analüüs. Kõik see võimaldas hinnata mullastiku kasutussobivust energiavõsakultuuride ja energiaheintaimede kasvatamiseks. Potentsiaalseks bioenergiatootmiseks sobivad kasvupinnad leiti pajule, hallile lepale, päideroole, roog-aruheinale ja ida-kitsehernele. Puuliikide kasvukeskkonna nõuete hindamisel on aluseks olnud raamat „Põllumaade metsastamine” [1]. Heintaimede kasutussobivust on hinnatud lähtuvalt R. Kõlli koostatud artiklitest muldade sobivuse kohta rohumaaviljeluseks raamatus „Eritüübiliste rohumaade rajamine ja kasutamine” [10].

Põllumajanduslikust kasutusest väljajäänud maadel toodetava energiakoguse leidmisel on paju kuivaine kalorimeetriliseks soojusväärtuseks võetud 19,5 MJ/kg [14]. Paju produktsiooni arvutamisel gleistunud ja gleimuldadel oli aluseks 24 aasta koguproduktsioon 106 t/KA/ha. Turvastunud glei- ja madalsoomuldadel on arvestatud pajuistandiku 24 a keskmist ja maksimaalset fütoproduktiivsust, vastavalt 142 ja 174 t/ha kuivainet [17]. Halli lepa arvel toodetava aastase energiakoguse leidmisel lähtuti 14 aasta vanuse hall-lepiku biomassi produktsioonist (89,6 t/ha) [19]; ühe kilogrammi kuivaine energeetilise väärtusena arvestati 19,18 MJ [21].

Kasutusest väljajäänud haritavalt maalt energiaheintaimede kasvatamisega toodetava energiakoguse leidmisel on võetud päideroo, roog-aruheina ja ida-kitseherne aastaseks kuivaine fütomassiks vastavalt 6t/ha [15], 5t/ha [16] ja 2,7 t/ha [9]. Heintaimede ühe kilogrammi kuivaine alumiseks kütteväärtuseks võeti päiderool ja ida-kitsehernel 16,6 MJ [3; 6], roog-aruheinal 16 MJ [13].

## Kasutamata põllumaad Tartu, Järva ja Ida-Viru maakondades

2004. aasta statistika alusel on Tartu maakonnas 100%-liselt kasutamata põllumaid 5170 hektarit (tabel 1). Maakasutusest on rohkem välja jäänud väheviljakad näivleetunud ja gleistumistunnustega ning gleistunud näivleetunud mullad, moodustades kogu kasutamata põllumaade pindalast vastavalt 14% ja 19%. Gleistumistunnustega ja gleistunud leetjaid ning leostunud muldi on haritava maa koosseisust välja jäänud kokku 576 hektarit. Rohkesti (11%) on kasutamata jäänud ka soomuldi.

Tartu maakonnas on üle poole põllumassiivide pinnast jäänud kasutamata 1858 hektaril haritavast maast. Valdava osa sööti jäänud põllumaast moodustavad ka siin näivleetunud ja gleistunud näivleetunud mullad, mida kokku on 640 hektarit. Suhteliselt palju on välja jäänud ka soomuldi (16%). Ent põllumaa harimisest on sageli loobutud ka viljakatel leostunud ja leetjatel muldadel ning parima maareserviga gleistunud leostunud ja leetjatel muldadel, kokku on sellist maad 21%.

Järva maakonnas on 100%-liselt kasutamata põllumaid 4047 hektarit. Rohkem on kasutusest välja jäänud taimede kasvuks hästi sobivad gleistumistunnustega ja gleistunud leetjad mullad (16%) ning leostunud mullad (13%). Leostunud gleimuldade kasutus on vähenenud 474 hektari võrra, suur osa endisest haritavast maast on kasutamata ka soomuldadega aladel (491 ha). Leetjaid muldi ning gleistumistunnustega ja gleistunud leostunud muldi on kasutamata vastavalt 383 ja 414 hektarit. Väiksemad maakasutuse muutused on toimunud rähk-, lammi-, leetunud ja näivleetunud muldadel.

**Tabel 1.** Põllumajanduslikust kasutusest välja jäänud mullad Tartu-, Järva- ja Ida-Virumaal

Mulla šiffer	Tartumaa		Järvamaa		Ida-Virumaa	
	100%*	50-100%	100%	50-100%	100%	50-100%
A	147,8	33,4	104,5	27,4	110,2	29,7
D	135,6	38,5	8,4	1,3	8,6	4,8
E2 ja E3	107,4	47,1	-	-	11,9	4,3
e ja (1,2,3,4)	159,7	50,3	35,0	18,0	143,0	99,3
K	-	-	238,4	344,9	453,8	780,0
Kh	-	-	6,8	2,4	668,5	852,3
KI	189,2	60,5	382,7	550,3	503,8	653,9
K0	121,0	61,9	530,4	736,7	833,6	1508,3
Kg, (g)	-	-	49,8	22,1	192,4	202,3
KIg, (g) ja K0g, (g)	575,9	261,0	1044,0	946,1	1393,1	1441,4
Gh	-	-	0,5	-	66,4	160,3
GI ja GI1	303,4	62,9	243,1	149,9	1630,7	1126,6
Gk	-	-	18,6	20,7	143,1	103,8
G0 ja G01	383,5	157,6	546,1	449,3	1637,7	1864
Lk	275,2	52,1	117,0	102,5	419,8	555,3
L(k), L, L(k)g, LG	14,2	1,9	-	-	8,5	5,0
Lkg, Lk(g)	343,0	68,9	135,4	61,6	646,8	514,5
LkG	20,7	-	9,5	12,0	82,3	60,2
LP	711,6	285,8	51,7	62,9	331,9	282,7
LPg, LP(g)	994,9	354,4	32,4	8,3	921,3	612,2
LPG	-	-	-	-	0,1	-
M, (S, R)	591,9	304,9	490,7	571,0	587,9	645,7
Paljandpinnas	5,4	3,0	2,1	-	26,7	10,1
Tehispinnas	8,7	-	-	0,7	2,8	2,4
Linnaalad	80,6	14,2	-	-	1,8	1,4
<b>Kokku, ha</b>	<b>5169,8</b>	<b>1858,1</b>	<b>4047,1</b>	<b>4088,1</b>	<b>10826,7</b>	<b>11520,8</b>

Järvemaal on üle poole põllumassiivide pinnast jäänud kasutamata 4088 hektaril põllumajandusmaast. Kõige rohkem (18% ehk 737 ha) on viljelusest välja jäetud taimekasvuks parimaid leostunud muldi, suhteliselt palju (14%) ka soomuldi. Leetjate muldade kasutus on vähenenud 550 hektari võrra (13%), gleistumistunnustega ja gleistunud leetjaid ja leostunud muldi kokku 946 hektarit.

Täielikult kasutamata muldi on Ida-Virumaal 10827 hektarit. Rohkem on kasutusest välja jäänud leostunud ja leetjaid gleimuldi, hõlmates vastavalt 1387 ja 1442 hektarit. Gleistumistunnustega ja gleistunud näivleetunud muldi on maakasutusest välja jäänud 921 hektarit, viljakaid leostunud ja gleistumistunnustega ning gleistunud leetjaid muldi mõnevõrra vähem (vastavalt 834 ja 776 ha). Väiksemad maakasutuse muutused on toimunud erodeeritud ja deluviaalmuldadel.

Ida-Virumaal leidub alasid, kus üle poole põllumassiivide pinnast on kasutamata jäänud, 11521 hektaril, millest 15% ehk 1681 hektarit moodustavad leostunud gleimullad, mõnevõrra vähem (13%) on parasniiskeid leostunud muldi. Kasutusest välja jäänud maadest esinevad 905 hektaril (8%) leetjad gleimullad, 7% ulatuses leidub paepealseid ja gleistumistunnustega ning gleistunud leetjaid muldi. Mahajäetud maade hulgas leidub vähesel määral ka leede-glei- ja turvastunud leede-glei ning erodeeritud ja deluviaalmuldadega alasid.

## Paju ja halli lepa kasvatamise võimalused

Maade metsastamisel tuleb lähtuda igast kultiveeritavast puuliigist eraldi, arvestades kultuuri nõudmisi mulla ja kliimaolude suhtes. Pajud kasvavad hästi piisava veevarustusega gleistunud, glei- ja turvastunud gleimuldadel. Heaks arenguks sobivad nii küllastunud kui küllastumata turvastunud gleimullad, samuti sobiva veerežiimiga leede-, näivleetunud ja leetunud mullad. Soomuldadest sobivad pajule siirde- ja madalsoomullad. Teise tähtsama energiapuuliigina kultiveeritav hall lepp on kohastunud kasvama väiksema füüsikalise savi sisaldusega muldadel. Kasvuks sobivad talle hästi, nagu enamikele teistelegi puuliikidele, kõrge viljelusväärtusega leostunud ja leetjad mullad. Samuti on hall lepp võimeline kasvama ka väheviljakatel leetunud ja näivleetunud muldadel [1].

**Tabel 2.** Pajuvõsa kasvatamise võimalused Tartumaa 100% kasutamata põllumaadel

Mulla liik	Mulla šiffer	Pind, ha	24 a produktsoon, t/KA/ha	Summaarne produktsoon, t/KA	Summaarne produktsoon, MWh	Produktsoon, MWh/a
Gleistunud ja gleimullad	Lkg	343	106	36358	196939	8206
	LPg	994,9	106	105459	571236	23802
	GI	303,4	106	32160	174200	7258
	Go	351,8	106	37291	201993	8416
	L(k)g, LG	14,2	106	1505	8152	340
	LkG	20,7	106	2194	11884	495
Turvastunud glei- ja madalsoomullad	M	591,9	142	84050	455271	18970
	Go <sub>1</sub>	31,7	142	4501	24380	1016
Turvastunud glei- ja madalsoomullad	M	591,9	174	102991	557868	23245
	Go <sub>1</sub>	31,7	174	5516	29878	1245
Kokku	2652				1644055	68502*

\* Summaarne aastaproduktsoon on leitud paju keskmise fütoproduktiivsuse korral.



Tartu maakonna täielikult kasutamata haritavast maast võiks paju vastavalt puuliigi kasvukeskkonna nõuetele energiametsana kultiveerida 2652 hektaril (tabel 2). Gleistunud ja gleimuldi oleks võimalik võtta kasutusele kolm korda enam kui turvastunud glei- ja madalloomuldi. Aastas võiks gleistunud ja gleimuldadel saada 9000 tonni puidu kuivmassi energeetilise väärtusega 49 tuhat MWh. Arvestades turvastunud glei- ja madalloomuldade keskmist aastaproduktiooni, on nendelt muldadelt võimalik saada 3700 tonni puitkütust ning seega kõigilt täielikult kasutamata maadelt kokku 12,6 tuhat tonni puidu kuivmassi energiasaldusega 69.000 MWh. Kui arvestada turvastunud glei- ja madalloomuldade maksimaalset produktiooni, toodetaks energiat 4500 MWh võrra rohkem.

Tartumaa maadel, kus üle poole põllumaade pindalast on põllumajandustootmisest välja jäänud, sobiks paju energiametsana kasvatada 949 hektaril (tabel 3). Gleistunud ja gleimuldadel saaks aasta jooksul toota 2776 tonni kuivpuitu. Turvastunud glei- ja madalloomuldadel oleks keskmise fütoproduktiivsuse korral võimalik toota 1895 tonni biomassi ning kokku moodustaks istandustest saadav kuivpuidumass 4670 tonni, energiasaldusega 25.000 MWh. Kui turvastunud glei- ja madalloomuldadel realiseeruks pajuistanduse maksimaalne tootmisvõime, oleks nendelt maadelt võimalik saada 2313 MWh lisaenergiat.

**Tabel 3.** Pajuvõsa kasvatamise võimalused Tartumaa >50% kasutamata põllumaadel

Mulla liik	Mulla šiffer	Pind, ha	24 a produktioon, t/KA/ha	Summaarne produktioon, t/KA	Summaarne produktioon, MWh	Produktioon, MWh/a
Gleistunud ja gleimullad	Lkg	68,9	106	7303	39560	1648
	LPg	354,4	106	37566	203485	8479
	GI	56,3	106	5968	32326	1347
	Go	148,9	106	15783	85493	3562
Turvastunud glei- ja madalloomullad	GI <sub>1</sub>	6,6	142	937	5077	212
	Go <sub>1</sub>	8,7	142	1235	6692	279
	M	304,9	142	43296	234519	9772
Turvastunud glei- ja madalloomullad	GI <sub>1</sub>	6,6	174	1148	6221	259
	Go <sub>1</sub>	8,7	174	1514	8200	342
	M	304,9	174	53053	287368	11974
Kokku		949			607152	25298*

\* Summaarne aastaproduktioon on leitud paju keskmise fütoproduktiivsuse korral.

Järva maakonna täielikult kasutamata haritavast maast oleks paju energiavõsana võimalik kasvatada 1457 hektaril (tabel 4). Gleistunud ja gleimuldadest sobiks paju kasvatamiseks 885 hektarit, mõnevõrra väiksemal pinnal (572 hektaril) leiaksid rakenduse turvastunud glei- ja madalloomullad. Ühe aasta jooksul oleks gleistunud ja gleimuldadel võimalik toota 3908 tonni puidu kuivmassi energeetilise väärtusega 21.000 MWh. Turvastunud glei- ja madalloomuldadel toodetakse keskmise fütoproduktiivsuse juures biomassi kuivainet 3386 tonni (18.000 MWh), maksimaalse saagikuse realiseerumise korral oleks aastane toodetav energiakogus 4133 MWh võrra suurem. Rajades pajuistandiku kõikidele Järvamaa täielikult kasutusest väljajäänud gleistunud, glei-, turvastunud glei- ja madalloomuldadele, on paju keskmise produktiooni korral aastane toodetav energiakogus 40.000 MWh.

Järvamaa enam kui 1/2 osas põllumajandustootmisest välja jäänud maadel on paju võimalik kasvatada 1252 hektaril (tabel 5). Gleistunud ja gleimuldadest leiaksid rakenduse 601 hektarit, kust aasta jooksul oleks võimalik saada 2655 tonni puidu kuivmassi energiasaldusega 14.000 MWh. Istanduse keskmise saagikuse juures on turvastunud glei- ja madalloomuldadel saadav biomassi kogus 3852 tonni energiasaldusega 21.000 MWh, paju maksimaalse produktiooni korral õnnestuks nendelt

maadelt saada 4702 MWh lisaenergiat. Pajuistandiku rajamisel kõikidele osaliselt viljelusest väljajäänud gleistunud, glei-, turvastunud glei- ja madalsoomuldadele oleks istandiku keskmise saagikuse korral toodetav energiakogus 35.000 MWh aastas.

**Tabel 4.** Pajuvõsa kasvatamise võimalused Järvamaa täielikult kasutamata põllumaadel

Mulla liik	Mulla šiffer	Pind, ha	24 a produktsoon, t/KA/ha	Summaarne produktsoon, t/KA	Summaarne produktsoon, MWh	Produktsoon, MWh/a
Gleistunud ja gleimullad	Lkg	135	106	14352	77742	3239
	LPg, (g)	32	106	3434	18603	775
	GI	234	106	24783	134240	5593
	Go	474	106	50223	272040	11335
	LkG	10	106	1007	5455	227
Turvastunud glei- ja madalsoomullad	Go <sub>1</sub>	72	142	10267	55611	2317
	GI <sub>1</sub>	9	142	1321	7153	298
	M	491	142	69679	377430	15726
Turvastunud glei- ja madalsoomullad	Go <sub>1</sub>	72	174	12580	68143	2839
	GI <sub>1</sub>	9	174	1618	8765	365
	M	491	174	85382	462485	19270
Kokku		1457			948274	39511*

\* Summaarne aastaproduktsoon on leitud paju keskmise fütoproduktiivsuse korral.

**Tabel 5.** Pajuvõsa kasvatamise võimalused Järvamaa osaliselt kasutamata põllumaadel

Mulla liik	Mulla šiffer	Pind, ha	24 a produktsoon, t/KA/ha	Summaarne produktsoon, t/KA	Summaarne produktsoon, MWh	Produktsoon, MWh/a
Gleistunud ja gleimullad	Lkg ja Lk(g)	62	106	6530	35369	1474
	LPg	8	106	880	4766	199
	GI	150	106	15889	86068	3586
	Go	369	106	39146	212040	8835
	LkG	12	106	1272	6890	287
Turvastunud glei- ja madalsoomullad	Go <sub>1</sub>	80	142	11360	61533	2564
	M	571	142	81082	439194	18300
Turvastunud glei- ja madalsoomullad	Go <sub>1</sub>	80	174	13920	75400	3142
	M	571	174	99354	538168	22424
Kokku		1252			845860	35244*

\* Summaarne aastaproduktsoon on leitud paju keskmise fütoproduktiivsuse korral.

Ida-Virumaa täielikult kasutamata haritavast maast leiaksid rakenduse 5515 hektarit, millest enamiku moodustavad gleistunud ja gleimullad (tabel 6). Keskmise kuivaine saak nimetatud muldadel oleks 20.000 tonni aastas, energeetilise väärtusega 107.000 MWh. Turvastunud glei- ja madalsoomuldadel on aastase keskmise fütoproduktiivsuse korral võimalik saada 6127 tonni puitkütust, seega kõigilt täielikult kasutamata maadelt kokku 26 000 tonni puidu kuivmassi energiasisaldusega 140.000 MWh. Kui arvestada turvastunud glei- ja madalsoomuldade maksimaalset produktiooni, toodetaks energiat 7479 MWh võrra rohkem.

**Tabel 6.** Pajuvõsa kasvatamise võimalused Ida-Virumaa täielikult kasutamata põllumaadel

Mulla liik	Mulla šiffer	Pind, ha	24 a produktsoon, t/KA/ha	Summaarne produktsoon, t/KA	Summaarne produktsoon, MWh	Produktsoon, MWh/a
Gleistunud ja gleimullad	Lkg, (g)	646,8	106	68561	371371	15474
	LPg, (g)	921,3	106	97658	528980	22041
	GI	1441,9	106	152841	827891	34495
	Go	1387,4	106	147064	796599	33192
	LkG	82,3	106	8724	47254	1969
	LPG	0,1	106	11	57	2
Turvastunud glei- ja madalsoomullad	Go <sub>1</sub>	250,3	142	35543	192522	8022
	GI <sub>1</sub>	188,8	142	26810	145219	6051
	LG <sub>1</sub>	8,5	142	1207	6538	272
	M	587,9	142	83482	452193	18841
Turvastunud glei- ja madalsoomullad	Go <sub>1</sub>	250,3	174	43552	235908	9830
	GI <sub>1</sub>	188,8	174	32851	177944	7414
	LG <sub>1</sub>	8,5	174	1479	8011	334
	M	587,9	174	102295	554096	23087
Kokku		5515			3368624	140359*

\* Summaarne aastaproduktsoon on leitud paju keskmise fütoproduktiivsuse korral.

Ida-Virumaa enam kui poolest sööti jäänud haritavast maast oleks energiavõsa võimalik kasvatada 4828 hektaril (tabel 7). Gleistunud ja gleimuldadel saaks aasta jooksul toota ligi 17.000 tonni kuivpuitu. Turvastunud glei- ja madalsoomuldadel oleks rotatsiooni keskmise paju saagikuse korral võimalik toota 6232 tonni biomassi ning kokku moodustaks istandustest saadav kuivpuidumass ligi 23.000 tonni energiasisaldusega ligi 124 tuhat MWh. Kui turvastunud glei- ja madalsoomuldadel realiseeruks pajuistanduse maksimaalne tootmisvõime, oleks kasutusest välja jäänud maadele pajuistanduse rajamisega võimalik aasta jooksul toota 132 tuhat MWh energiat.

**Tabel 7.** Pajuvõsa kasvatamise võimalused Ida-Virumaa osaliselt kasutamata põllumaadel

Mulla liik	Mulla šiffer	Pind, ha	24 a produktsoon, t/KA/ha	Summaarne produktsoon, t/KA	Summaarne produktsoon, MWh	Produktsoon, MWh/a
Gleistunud ja gleimullad	Lkg, (g)	515	106	54537	295409	12309
	LPg, (g)	612	106	64893	351505	14646
	GI	905	106	95930	519621	21651
	Go	1681	106	178186	965174	40216
	LG	2	106	212	1148	48
	LkG	60	106	6381	34565	1440
Turvastunud glei- ja madalsoomullad	Go <sub>1</sub>	183	142	25986	140758	5865
	GI <sub>1</sub>	222	142	31467	170447	7102
	LG <sub>1</sub>	3	142	426	2308	96
	M	646	142	91689	496651	20694
Turvastunud glei- ja madalsoomullad	Go <sub>1</sub>	183	174	31842	172478	7187
	GI <sub>1</sub>	222	174	38558	208858	8702
	LG <sub>1</sub>	3	174	522	2828	118
	M	646	174	112352	608572	25357
Kokku		4828			2977585	124066*

\* Summaarne aastaproduktsoon on leitud paju keskmise fütoproduktiivsuse korral.

Tartu maakonna täielikult kasutamata põllumaadest sobiks halli lepa kasvatamiseks 3866 hektarit, millelt on aasta jooksul võimalik toota 132.000 MWh (tabel 8) energiat. Osaliselt kasutusest väljajäänud maadelt oleks toodetav energiakogus halli lepa kasvuks sobival 1350 hektaril 46.000 MWh. Järvamaa täielikult ja osaliselt kasutamata haritavast maast sobiks halli leppa kasvatamiseks veidi üle 3000 hektari.

**Tabel 8.** Halli lepa kasvatamise võimalused kasutamata põllumaadel

Maakond	Pind, ha	14 a. summaarne produktsoon, tonni	14. a. summaarne produktsoon, MWh	Produktsoon, MWh/a
Tartumaa 100%*	3866	346394	1845508	131822
50-100%	1350	120960	644448	46032
Järvamaa 100%	3186	285466	1520897	108636
50-100%	3010	269696	1436880	102634
Ida-Virumaa 100%	8072	723251	3853322	275237
50-100%	8266	740634	3945931	281852

\* Põllumajanduslikust maakasutusest väljajäänud maa, %.

Kokku oleks aastane toodetav energiakogus nendel põldudel 211 tuhat MWh. Ida-Virumaa nii osaliselt kui täielikult kasutamata põllumajandusmaal on halli lepa kasvatamiseks sobivaid muldi üle 70%. Rajades halli lepa istandused teiste maakondadega võrreldes suurtele aladele, oleks aastane toodetav energiakogus keskmiselt 557 tuhat MWh.

### Heintaimede kasvatamise võimalused Tartu-, Järva- ja Ida-Virumaal

Ida-kitseherne ja päideroog kasvavad hästi kerge ja keskmise liivsavi lõimisega parasniisketel (K, Ko, KI, LP), nõrgalt erodeeritud (Lk<sub>e</sub>, Lp<sub>e</sub>, Ko<sub>e</sub>, KI<sub>e</sub>, K<sub>e</sub>) või hästi kuivendatud gleistunud (Kg, Kog, KIg, LPg) ja gleimuldadel (Gk, Go, G(o), GI, LPG). Keskmiselt sobivad käsitletud heintaimedele liiv-, saviliiv- ja savimullad, samuti kuivendamata gleistunud ja gleimullad. Roog-aruheina kasvuks sobivad eelnimetatud kerge ja raske lõimisega parasniisked, gleistunud ja nii kuivendatud kui kuivendamata gleimullad keskmiselt [10].

Tartu maakonna täielikult kasutamata muldadest sobivad nii ida-kitseherne kui päideroo optimaalseks kasvuks 1257 hektarit, keskmiselt sobivaid muldi on üle kahe korra rohkem; osaliselt kasutamata haritavast maast saaks nimetatud kultuure kasvatada kokku 1481 hektaril (tabel 9). Rajades nii osaliselt kui täielikult kasutusest väljajäänud maadele ida-kitseherne taimiku, on võimalik 5750 hektarilt saada ligi 16.000 tonni biomassi kuivainet energiasisaldusega 72 tuhat MWh. Päideroo oluliselt suurema saagikuse tõttu oleks nendelt aladelt energiat võimalik toota üle kahe korra rohkem. Roog-aruheina kasvatamiseks sobiva maa moodustab täielikult ja osaliselt väljajäänud põllumaadest vastavalt 4269 ja 1481 hektarit. Kokku oleks 5750 hektarilt energiat võimalik toota 128.000 MWh.

Järvamaa täielikult kasutamata 4047 hektarist sobiks ida-kitseherne ja päideroo kasvatamiseks 3351 hektarit, millest 72% ulatuses on tagatud taimede optimaalne kasv. Osaliselt kasutamata põllumaast leiaksid rakenduse 3393 hektarit. Ida-kitseherne rajamisel selle kultuuri kasvuks hästi ja keskmiselt sobivatele muldadele oleks energiat võimalik toota 84 tuhat MWh; kasvatades nendel pindadel ida-kitseherne asemel päideroogu, toodetaks energiat oluliselt rohkem (187.000 MWh). Roog-aruheina kasvatamiseks sobivat pinda on kogu Järva maakonnas 6745 hektarit; nende alade täielikul kasutamisel oleks toodetav energiakogus 150.000 MWh.

Ida-Virumaa täielikult ja osaliselt kasutamata maadest sobib nii ida-kitseherne kui päideroo kasvatamiseks vastavalt 8829 ja 9390 hektarit. Ida-kitseherne heintaimiku rajamisel kultuuri kasvuks

sobivatele väljajäänud aladele saaks aasta jooksul (alates teisest kasvuaastast) energiat toota 227.000 MWh; päideroo puhul oleks toodetav energiakogus 504 000 MWh. Ida-Virumaal on roog-aruheina kasvatamiseks sobivat pinda kokku veidi üle 18.000 hektari; nende alade täielikul rakendamisel oleks toodetav energiakogus 405.000 MWh.

**Tabel 9.** Energiaheina kasvatamise võimalused kasutusest välja jäänud haritavaal maal

Maakond	Pind, ha			Energiasisaldus, MWh		
	Ida-kitsehernes	Päideroog	Roog-aruhein	Ida-kitsehernes	Päideroog	Roog-aruhein
Tartumaa 100%* III**	1257	1257	-	15646	34769	-
100% II	3012	3012	4269	37503	83340	94867
50-100% III	577	577	-	7187	15972	-
50-100% II	904	904	1481	11249	24997	32907
Järvamaa 100% III	2425	2425	-	30186	67081	-
100% II	927	927	3351	11539	25641	74476
50-100% III	2670	2670	-	33238	73862	-
50-100% II	724	724	3393	9010	20022	75409
Ida-Virumaa 100% III	4848	4848	-	60351	134114	-
100% II	3982	3982	8829	49570	110155	196200
50-100% III	5522	5522	-	68749	152775	-
50-100% II	3868	3868	9390	48162	107026	208676

\* Põllumajanduslikust maakasutusest väljajäänud maa, %.

\*\* Kultuuride sobivus muldadele; III – hästi sobiv, II – keskmiselt sobiv.

## Kokkuvõte

Kasutusest väljajäänud põllumajandusmaadele tuleb leida alternatiivne väljund. Arvestades Euroopa Liidu direktiive ning Eesti riiklikku eesmärki seoses energia varustuskindluse säilitamise või isegi suurendamisega, on otstarbekas kasutada väljajäänud alasid energia tootmiseks. Kasvatades nii osaliselt kui täielikult kasutamata aladel Põhja-Euroopa tingimustesse sobivaimat ning produktiivseimat energiaheintaimet – päideroogu, on Tartu-, Järva- ja Ida-Virumaal võimalik katta vastavalt 6, 21 ja 10% maakondade 2004. a energiatarbest. Rajades nii täielikult kui osaliselt söötijäänud aladele kultuuride kasvukeskkonna nõudlusi arvestades energiametsadena hall-lepikud, oleksid neis maakondades esimestel kasvuaastatel toodetavad energiakogused kuni kolm korda suuremad kui pajuistandike korral. Tartu-, Järva- ja Ida-Virumaa 2004 aasta energiatarbest oleks kõigil kultuurile sobivatel kasutamata aladel halli lepa kultiveerimise korral võimalik katta vastavalt 6, 24 ja 11%.

## Kirjandus

1. Asi, E.; Annuk, K.; Eilart, S.; Kärner, M.; Loid, H.; Muru, J.; Older, H.; Rand, H.; Sarand, R.; Kölli, R.; Laas, E. (2004) Põllumaade metsastamine. Tartu.
2. Astover, A.; Roostalu, H.; Lauringson, E.; Lemetti, I.; Selge, A.; Talgre, L.; Vasiliev, N.; Mõtte, M.; Tõrra, T.; Penu, P. (2006) Changes in agricultural land use and in plant nutrient balances of arable soils in Estonia. Archives of Agronomy and Soil Science, 52(2), 223 - 231.
3. Bender, A. (2006) Liblikõielised heintaimed. Eritüübiliste rohumaade rajamine ja kasutamine. I osa: 215–221.

4. Eesti Statistika Aastaraamat 2006. (2006) Tallinn: Statistikaamet.
5. Heinsoo, K.; (2003) Ökopuhasti sobib väikeasulatesse.  
URL: <http://www.zbi.ee/life/?kat=88> [12.10.06]
6. Hovi, M. (1995) Mitmeaastased rohttaimed energeetilise toormena Eesti Vabariigis. Magistriväitekirj. Tartu.
7. Hovi, M. (2006) Energiahein kui soojusenergia tootmise potentsiaalne tootaine. Eritüübiliste rohumaade rajamine ja kasutamine. Tartu Ülikooli Kirjastus. II osa: 655–659.
8. Hovi, M.; Hovi, K.; Jürjenson, K. (2001) Hein kütusena. Kogumikus: Tiit, V. (toim). TEUK teise konverentsi kogumik. EPMÜ kirjastus, Tartu: 127–128.
9. Jürgens, K. (2005) Biomassikultuurid – energiahein. Projekt: „Biokütuse tootmise ja kasutamise riikliku programmi ettevalmistamine”. EPMÜ ja TTÜ uuring,  
URL: [www.agri.ee/link.php?id=13579&filename=2005,09,16](http://www.agri.ee/link.php?id=13579&filename=2005,09,16) [01.05.07]
10. Kõlli, R. (2006) Muldade sobivus rohumaaviljeluseks. Eritüübiliste rohumaade rajamine ja kasutamine. Tartu Ülikooli Kirjastus. I osa: 62–77.
11. Kütuse- ja energiamajanduse pikaajalise riiklik arengukava (2004) RT I 2004, 88, 601.
12. Lewandowski, I.; Scurlock, J. M. O.; Lindvall, E.; Christou, M. (2003) The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in US and Europe. Biomass and Bioenergy, 25: 335–361.
13. Luud, A.; Ani, M. (2006) Kohalike energiaallikate energeetiline potentsiaal. Keskkond ja põlevkivi kaevandamine Kirde-Eestis. Publikatsioonid 9/2005. Tallinna Ülikooli Ökoloogia Instituut, 160–171.
14. Maier, J.; Vetter, R. (2004) Biomass yield and fuel characteristics of short-rotation coppice (willow, poplar, empress tree). Institute for Land Management Compatible to Environmental Requirements.  
URL: <http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB> [30.08.07]
15. Pahkala, K.; Isolahti, M.; Partala, A.; Suokannas, A.; Kirkkari, A-M.; Peltonen, M.; Sahkramaa, M.; Lindh, T.; Paappanen, T.; Kallio, E.; Flyktman, M. (2005) Ruokohelven viljely ja korjuu energian tuotantoa varten. Maa- ja elintarviketalous: 1: 31.  
URL: <http://www.mtt.fi/met/pdf/met1.pdf> [15.10.07]
16. Pahkala, K.; Pihala, M. (2000) Different plant parts as raw material for fuel and pulp production. Industrial Crops and Products, 11: 119–128.
17. Ross, J.; Koppel, A.; Roostalu, H. (1996) Kas pajuistandikul on Eestis perspektiivi energiametsana. Põllumajandus" nr. 11, 15-19.
18. Soosaar, S. (2005) Euroopa Liidu energiapoliitikast seoses biokütustega. Projekt: „Biokütuse tootmise ja kasutamise riikliku programmi ettevalmistamine”. EPMÜ ja TTÜ uuring.  
URL: [www.agri.ee/link.php?id=13579&filename=2005,09,16](http://www.agri.ee/link.php?id=13579&filename=2005,09,16) [01.05.07]
19. Uri, V. (2000) Halli ja hübriidlepa kultuurid endisel põllumaal ja nende biomassi produktsioon. – Metsanduslikud Uurimused XXXII, Tartu, 78–89.
20. Valgma, I. (2003) Estonian oil shale resources calculated by GIS method. Oil Shale. 20(3), 404–411.
21. Vares, V.; Kask, Ü.; Muiste, P.; Pihu, T.; Soosaar, S. (2005) Biokütuse kasutaja käsiraamat.

# Arukaasikud endistel põllumajandusmaadel

Merit Kund

Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut

Uuringu objektiks olid endistel põllumajandusmaadel kasvavad kaheksa-aastased arukase kultuurid. Puud olid istutatud kilemultšile ja multšimata mullale. Pärast kaheksat kasvuaastat olid kilemultšil kasvanud puude kõrgus (H) ja rinnasdiameeter (edaspidi D) statistiliselt oluliselt suuremad ( $p < 0.001$ ) kui multšimata mullal kasvanud kaskedel. Kilemultšil kasvavate kaskede aastane kõrguse juurdekasv oli statistiliselt oluliselt suurem ( $p < 0.05$ ) esimesel kuuel aastal pärast istutust võrreldes multšimata mullal kasvanud kasekedega. Aastane kõrguse juurdekasv ei olnud oluliselt erinev seitsmendal ja kaheksandal kasvuaastal. Kilemultši kasutamine omas statistiliselt olulist ( $p < 0.001$ ) mõju elusvõra algusele kaheksa aasta vanustes kultuurides. Elusvõra suhtelise pikkuse erinevus vähenes kilemultšil ja multšimata mullal kasvavate puude vahel pärast kuuendat kasvuaastat. Seitsmendal ja kaheksandal kasvuaastal ei esinenud elusvõra suhtelise pikkuse osas enam statistilist usaldatavat erinevust ( $p > 0.05$ ). Arukaskede kõrguskasv multšimat mullal oli kõige intensiivsem kahkjäl mullal (*Glossic Podzoluvisol*), leostunud mullal (*Calcaric Cambisol*), leetunud mullal (*Calcaric Luvisol*) ja gleimullal (*Dystic Gleysol*).

## Sissejuhatus

Ühiskonnas toimunud muutuste tõttu on Eestis põllumajandusmaade sihipärane kasutus oluliselt vähenenud, mille tagajärjel on tekkinud ligikaudu 400.000 ha mittemajandatavaid põllumajandusmaid [17]. Sama tendents iseloomustab ka teisi endisi sotsialismimaad Ida-Euroopas [4; 7; 31; 32]. Üks alternatiivne võimalus selliste maade kasutamises on nende metsatamine lehtpuudega. Lehtpuudel on endistel põllumajandusmaadel olulisi eeliseid okaspuude ees. Noores eas on lehtpuud okaspuudest enamasti kiirema kasvuga, nad parandavad mullatingimusi, on kvaliteetsema puiduga ja vähem ohustatud seenhaiguste ning putukkahjurite poolt. Eestis on lehtpuud tavaliselt esimeseks generatsiooniks endistel põllumajandusmaadel. Lehtpuude kasvatamine on majanduslikust seisukohast oluline, kuna nõudlus tastuenergia ja paberipuidu järele kasvab pidevalt.

Arukask (*Betula pendula* Roth.) ja sookask (*B. pubescens* Ehrh.) on väga laialdaselt ja sagedasemalt levinud lehtpuuliigid Euroopas [11]. Mõlemad puuliigid on ka Eestis kõige levinumad lehtpuud; 2004. aasta andmete kohaselt moodustavad kaasikud 30% kogu Eesti metsamaast [39]. Mineraalmullal kasvavad arukased on kiirekasvulised [11] ja parema tüve kvaliteediga kui sookased [14], olles metsatööstusele palju väärtuslikumad. Arukase osatähtsus kasvas Põhja-Euroopas oluliselt 1980ndatel ja 1990ndatel [19; 23]. Ka Eestis kasvas kasepuidu kasutamine eelmise sajandi viimasel kümnendil oluliselt [33].

Tuginedes varasematele uuringutele, võib arukaske pidada Põhja-Euroopas väga perspektiivseks puuliigiks endiste põllumajandusmaade metsastamiseks [7; 12; 18; 34]. Arukask on vähenõudlik põllumuldade suhtes ning kasvab väga edukalt erinevatel mullatüüpidel [6; 37], kuigi pärast istutust sõltub selle kasvamaminek paljuski konkurentsisest rohttaimedega. Rohttaimed võistlevad kaseistikutega vee ja toitainete [8; 13] ning valgustingimuste pärast [18]. Seetõttu on rohttaimede tõrjumine üks olulisemaid metsakavatuslikke võtteid arukaasikute kasvatamisel. Istutatud kasekultuurides tuleb esimesel kahel või kolmel aastal kindlasti teada tuntud rohttaimede eemaldamise võtteid, nagu näiteks tallamine ja niitmine [38], mis aga on aeganõudev ja tööjõumahukas. Mõeldes rohutõrjemeetodite alternatiividele endistel põllumajandusmaadel, saab rohttaimede kasvu takistada kilemultši kasutades. Veelgi enam, kilemultš kiirendab oluliselt arukaskede kasvu [1; 10].

Kuigi arukaasikute rajamine endistele põllumajandusmaadel on olnud Eestis populaarne [17], nagu ka naabermaades [6; 12; 18], ei ole arukaskede istutusjärgset kasvu endistel põllumajandusmaadel uuritud. Muuhulgas on eriti vähe tähelepanu pööranud arukase istutusjärgsele kasvule kilemultšil. Kuni praeguseni ei ole ka loodud kasvumudelid, mida saaks kasutada majanudlike kalkulatsioonide tegemiseks, et kirjeldada arukaskede kasvu erinevatel põllumuldadel.

Uurimustöö põhieesmärkideks oli (i) uurida arukaskede istutusjärgset kasvu kilemultsil ja multšimata põllumajandusmaal, (ii) anda metsakasvatustlike soovitusi arukaasikute kasvatamiseks endistel põllumajandusmaadel.

## Uurimisobjektid

Töö käigus uuriti 11 arukasekultuuri Eesti endistel põllumajandusmaadel. Kultuurid asusid erinevates Eestimaa paikades, pikkuskraadidel 57°86'...59°09' N ja laiuskraadidel 22°54'...27°43' E. Aastane keskmine temperatuur kultuurides on püsinud vahemikus 4,0...6,0 °C. Kõige külmem kuu on veebruar (-3,5...-7,5 °C) ja kõige soojem juuli (16,0...17,5 °C). Aastane keskmine sademete hulk kõigis kultuurides on olnud umbes 650 mm [19].

Uuritud kultuurid rajati 1999. aastal üheaastaste paljasjuureliste taimedega. Kõik kultuurid olid pindalaga 1 hektar. Kõikides kultuurides valmistati enne kasetaimede istutamist maapind ette [34]. Kultuuride istutustihedus varieerus 2500...3300 taimeni hektaril. Musta multšikilet kasutati kõigis kultuurides, välja arvatud Lääne kultuur (tabel 1). Kilemultš pandi maapinnale 1 m laiuste ribadena põhimõttega, et see kataks terve rea üle kogu kultuuri.

Niisi istutati osa kaski kilemultšile ning teine osa multšimata mullale. Igas kultuuris istutati vähemalt 30% kaskedest kilemultšile. Kaskede esimese kasvuaasta jooksul pärast istutamist teostati mõningad hooldustööd nagu rohttaimede tallamine, niitmine ning loodusliku kaseuuenduse eemaldamine. Kõik kultuurid olid tarastatud, et vältida võimalikke ulukikahjustusi.

## Puude mõõtmine

Mõõtmisandmeid kasekultuuridest koguti aastatel 2000...2006. 2000. aastal rajati 3-meetri laiused transekdid juhuprintsiibil risti läbi iga kultuuri. Transektide asukohad märgistati, et neid oleks ka järgnevatel mõõtmiskordadel lihtne leida. Sama aasta sügisel nummerdati igas kultuuris 100 puud metallist numbriplaatidega ning mõõdeti puude kasvuparameetrid (kõrgus ja elusvõra algus) ning arvutati aastane kõrguse juurdekasv.

Aastatel 2001...2006 kodusmõõdistati kõik mudelpuud; kõrgus ning elusvõra alguse kõrgus mõõdeti sügisel, igaastane kõrguse juurdekasv arvutati eelmise aasta kõrguse ja sama aasta kõrguse vahena. Alates aastast 2003 mõõdeti ka puude rinnasdiameetrit (D). Et iseloomustada puude kuju kaheksa aasta vanuselt, arvutati sihvakuse suhe (H/D). Kõrguse ja elusvõra alguse kõrgusega arvutati elusvõra suhteline pikkus (ESP). Peamised karakteristikud ( $\pm$ SE) on toodud tabelis 1.

## Mullaanalüüs

Kõigis kultuurides tehti üks mulla sügavkaeve (sügavusega 1 m). Proovid laboratoorseteks analüüsideks võeti igast mullahorisondist ning, lähtudes FAO-UNESCO klassifikatsioonist, määrati mullatüüp. Muldade analüüsimisel määrati happesus, üldlämmastik Kjeldahli meetodil, vaba fosfor ning leek-fotomeetrilisel meetodil kaalium. Kõik mullaproovid analüüsiti Eesti Maaülikooli taimebiokeemia laboris. Mullatüübid ja huumushorisondi karakteristikud on toodud tabelis 2.



**Tabel 1.** Peamised karakteristikud ( $\pm$ SE) 8-aasta vanuses arukasekultuuris: asukoht, puude arv hektaril, rinnasdiameeter (D), keskmine kõrgus (H), ja elusvõra pikkuse suhe (ESP) kaskedel, mis kasvasid kilemultšil ja multšima maapinnal.

Kultuur	Asukoht	Puude arv ha <sup>-1</sup>	Multšimata			Kilemultš		
			D (cm)	H (m)	ESP (%)	D (cm)	H (m)	ESP (%)
Ida-Viru	59°09'N 27°34'E	2460	5,4 $\pm$ 0,2 <sup>c*</sup>	6,5 $\pm$ 0,1 <sup>d</sup>	87,9 $\pm$ 0,8 <sup>d</sup>	6,1 $\pm$ 0,2 <sup>c</sup>	7,1 $\pm$ 0,2 <sup>cd</sup>	89,3 $\pm$ 1,5 <sup>c</sup>
Järva	58°83'N 26°06'E	1840	5,3 $\pm$ 0,2 <sup>c</sup>	6,0 $\pm$ 0,2 <sup>d</sup>	93,3 $\pm$ 0,9 <sup>cd</sup>	7,3 $\pm$ 0,3 <sup>cd</sup>	7,5 $\pm$ 0,2 <sup>cd</sup>	86,4 $\pm$ 2,1 <sup>bc</sup>
Pärnu	58°66'N 24°85'E	2950	4,1 $\pm$ 0,1 <sup>b</sup>	5,4 $\pm$ 0,1 <sup>c</sup>	80,0 $\pm$ 0,8 <sup>bc</sup>	6,9 $\pm$ 0,4 <sup>c</sup>	7,4 $\pm$ 0,2 <sup>cd</sup>	84,3 $\pm$ 2,4 <sup>bc</sup>
Rapla	58°91'N 24°90'E	3070	5,5 $\pm$ 0,1 <sup>c</sup>	6,9 $\pm$ 0,1 <sup>e</sup>	78,6 $\pm$ 0,7 <sup>b</sup>	6,1 $\pm$ 0,2 <sup>c</sup>	7,7 $\pm$ 0,1 <sup>d</sup>	73,0 $\pm$ 1,2 <sup>a</sup>
Lääne	58°89'N 24°10'E	2000	6,7 $\pm$ 0,2 <sup>d</sup>	6,9 $\pm$ 0,1 <sup>e</sup>	90,1 $\pm$ 0,6 <sup>d</sup>	**	**	**
Viljandi	58°15'N 25°54'E	2130	6,6 $\pm$ 0,1 <sup>d</sup>	7,2 $\pm$ 0,1 <sup>e</sup>	83,3 $\pm$ 0,5 <sup>c</sup>	6,9 $\pm$ 0,4 <sup>c</sup>	6,6 $\pm$ 0,2 <sup>c</sup>	87,0 $\pm$ 1,4 <sup>bc</sup>
Valga	57°87'N 26°21'E	1790	3,6 $\pm$ 0,2 <sup>b</sup>	4,7 $\pm$ 0,2 <sup>bc</sup>	68,1 $\pm$ 1,7 <sup>a</sup>	5,8 $\pm$ 0,6 <sup>c</sup>	5,7 $\pm$ 0,3 <sup>bc</sup>	74,5 $\pm$ 3,2 <sup>a</sup>
Võru	57°86'N 26°65'E	1750	4,0 $\pm$ 0,2 <sup>b</sup>	4,6 $\pm$ 0,2 <sup>b</sup>	87,0 $\pm$ 0,6 <sup>cd</sup>	5,5 $\pm$ 0,5 <sup>c</sup>	5,9 $\pm$ 0,3 <sup>bc</sup>	90,2 $\pm$ 1,0 <sup>c</sup>
Põlva	58°08'N 27°43'E	1960	4,6 $\pm$ 0,2 <sup>b</sup>	5,8 $\pm$ 0,1 <sup>cd</sup>	84,5 $\pm$ 0,5 <sup>c</sup>	3,4 $\pm$ 0,3 <sup>b</sup>	5,0 $\pm$ 0,3 <sup>b</sup>	81,3 $\pm$ 2,1 <sup>b</sup>
Hiiu	58°98'N 22°54'E	1570	2,0 $\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	2,5 $\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	72,0 $\pm$ 2,5 <sup>b</sup>	2,4 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	2,8 $\pm$ 0,5 <sup>a</sup>	82,2 $\pm$ 0,3 <sup>b</sup>
Tartu	58°44'N 26°75'E	1340	4,4 $\pm$ 0,3 <sup>b</sup>	5,3 $\pm$ 0,2 <sup>bcd</sup>	85,2 $\pm$ 0,8 <sup>cd</sup>	8,4 $\pm$ 0,2 <sup>d</sup>	8,7 $\pm$ 0,2 <sup>e</sup>	83,8 $\pm$ 1,4 <sup>b</sup>

\* - Tähted erinevates tulpades näitavad statistiliselt olulist erinevust kultuuride vahel.

\*\* - Kilemultši ei kasutatud.

**Tabel 2.** Huumushorisoni peamised karakteristikud uuritud kultuurides: mullatüüp, happesus (pH<sub>KCl</sub>), lämmastiku (N), fosfori (P) ja kaalumi (K) kontsentratsioonid.

Kultuur	Mullatüüp	pH <sub>KCl</sub>	N (g kg <sup>-1</sup> )	P (mg kg <sup>-1</sup> )	K (mg kg <sup>-1</sup> )
Ida-Viru	<i>Gleimuld</i>	4,3	1,07	4	42
Järva	<i>Leostunud muld</i>	5,9	1,80	22	169
Pärnu	<i>Gleimuld</i>	6,8	2,71	39	202
Rapla	<i>Leostunud muld</i>	6,2	1,46	56	214
Lääne	<i>Gleimuld</i>	4,0	1,37	15	14
Viljandi	<i>Kabekjas muld</i>	5,6	1,62	19	127
Valga	<i>Gleimuld</i>	5,0	1,23	15	59
Võru	<i>Leetjas muld</i>	7,0	0,94	79	191
Põlva	<i>Kabekjas muld</i>	6,5	0,81	54	94
Hiiu	<i>Räbkene muld</i>	7,2	1,97	31	169
Tartu	<i>Leetjas muld</i>	6,5	1,26	22	177

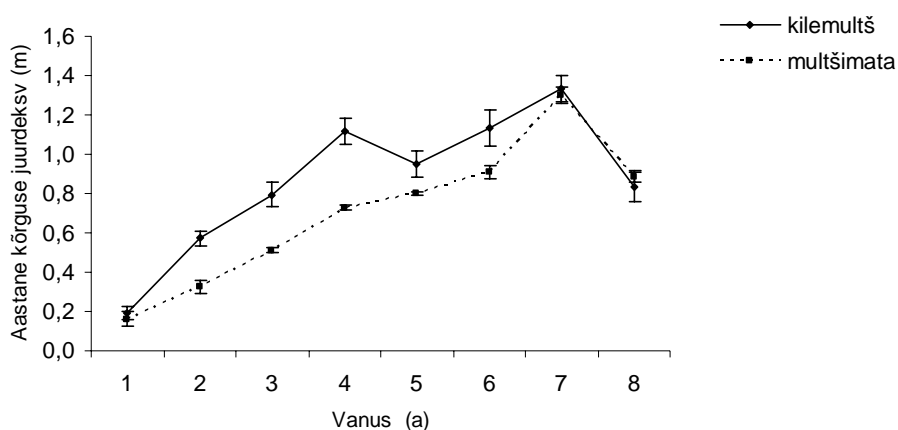
## Statistiline analüüs

Kasvuparameetrite normaalsust testiti *Kolmogorov-Smirnov'i*, *Lilliefors'i*, ja *Shapiro-Wilkinson'i* testidega. Andmete normaliseerimiseks kasutati mitmeid transformatsioone. Mõõtmisandmete analüüsimisel kasutati dispersioonanalüüsi, et testida kilemultšil kasvavate puude statistilist olulisust pärast kaheksandat kasvuaastat. Aritmeetilised keskmised arvutati 95% usaldatavuse piires. Kõik aritmeetilised keskmised on töös esitatud koos aritmeetilise keskmise veaga. Kõigi kasutatud meetodite korral oli olulisuse nivoo  $\alpha=0,05$ . Andmed analüüsiti programmiga *STATISTICA 7*.

## Tulemused

Pärast kaheksat kasvuaastat multšimata mullal kasvanud kaskede keskmine kõrgus kultuuris jäi vahemikku 2,5...7,2 m. Kultuuride omavahelises võrdluses oli multšimata mullal kasvanud kaskede kõrgus statistiliselt oluliselt suurem Viljandi, Rapla ja Lääne kultuurides (tabel 1). Keskmine D oli kõige suurem Lääne kultuuris ( $6,7\pm0,2$  cm) ning kõige väiksem Hiiu kultuuris ( $2,0\pm0,2$  cm). Kilemultšil kasvanud kõige suuremad kased mõõdeti Tartu kultuuris (keskmine kõrgus ja diameter  $8,7\pm0,2$  m ja  $8,4\pm0,2$  cm) (tabel 1). Kaheksa aasta vanustes kultuurides olid kilemultšil kasvanud puude kõrgus ( $p<0,001$ ) ja D ( $p<0,001$ ) oluliselt suuremad kui samad parameetrid multšimata mullal kasvanud puudel, kuigi kilemultšil ei olnud olulist erinevust viimase aasta kõrguse ( $p=0,672$ ) ja diameetri ( $p=0,112$ ) juurdekasvu osas. Olenedes kultuurist, oli puude sihvakuse suhe multšimata mullal 1,0...1,5 ja kilemultšil kasvanud puude sihvakuse suhe 1,0...1,3. Enamikus kultuuridest oli sihvakuse suhe madalam kilemultšil kasvavatel kaskedel kui neil kaskedel, mis kasvasid multšimata mullal, ehkki need erinevused ei olnud statistiliselt olulised ( $p=0,142$ ).

Puude kõrguse juurdekasv suurenes esimesel seitsmel kasvuaastal. Võrreldes seistmenda kasvuaastaga oli kaheksandal kõrguse juurdekasv väiksem. Teisest kuni kuuenda kasvuaastani oli multšikilel kasvanud kaskede aastane kõrguse juurdekasv statistiliselt usaldatavalt ( $p<0,05$ ) suurem kui katmata maapinnal kasvanud puudel. Seitsmendal ja kaheksandal kasvuaastal ei olnud aga juurdekasvude erinevus enam statistiliselt usaldatav (joonis 2).



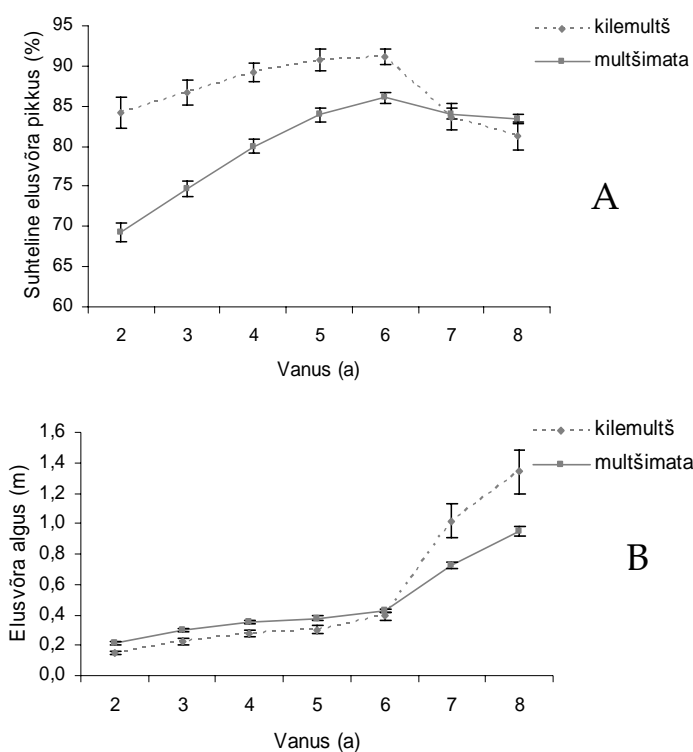
**Joonis 2.** Arukaskede iga-aastane kõrguse juurdekasv (koos 95% usalduspiiridega) kasvades kilemultšil ja multšimata mullal sõltuvalt vanusest.

8 aasat kasvanud puudel oli keskmine distant elusvõra alguse ja maapinna vahel multšimata maal suurim Rapla kultuuris ( $2,5\pm0,1$  m) ja väiksem Ida-Viru kultuuris ( $0,2\pm0,05$  m). Kilel kasvanud kaskedel oli see keskmine suurim Rapla kultuuris ( $3,5\pm0,1$  m). 8-aastastes kultuurides oli multšikilel statistiliselt usaldatav ( $p<0,001$ ) mõju puude elusvõra alguse kõrgusele ( $p<0,001$ ). Puude elusvõra alguse kõrgus püsis uuritud kultuurides esimestel kuuel kasvuaastal ligikaudu samal tasemel. Arvestatav elusokste suuremine algas puudel seitsmendast kasvuaastast ja jätkus kaheksandal.

Seejuures oli kilel kasvatel puudel elusokste suuremine seitsmendal ja kaheksandal aastal usaldatavalt intensiivsem kui katmata maapinnal kasvavatel puudel (joonis 3A).

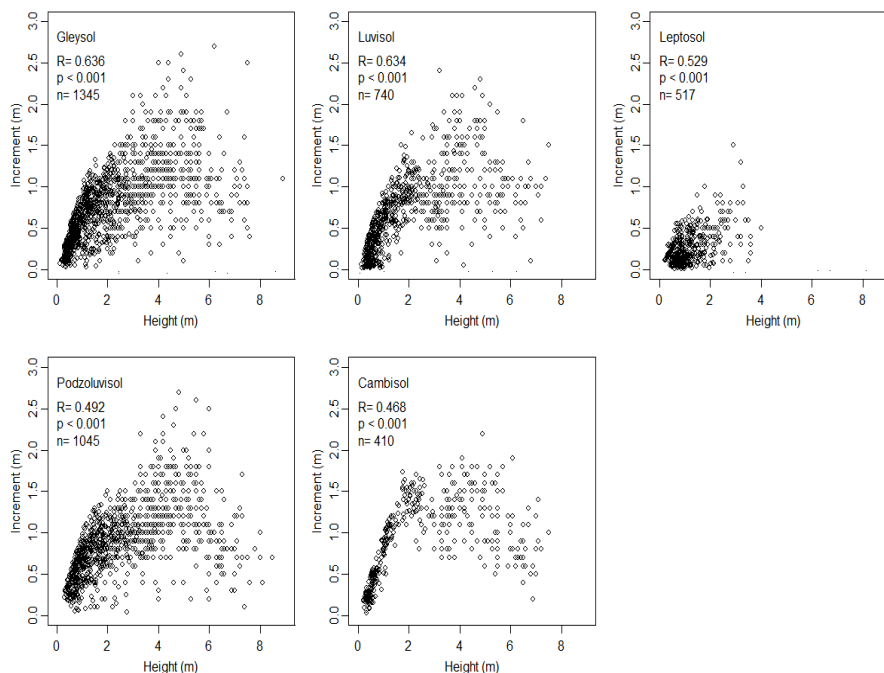
Pärast kaheksandat kasvuaastat varieerus ESP kultuurides katmata maapinnal kasvanud puudel 68,1...93,3% ja multškil kasvanud puudel 68,0...90,2% (tabel 1). Pärast kaheksandat kasvuaastat oli multškil statistiliselt usaldatav ( $p < 0,001$ ) mõju ESP ( $p < 0,001$ ). Esimesel kuuel kasvuaastal oli kilel kasvanud puude ESP statistiliselt usaldatavalt suurem ( $p < 0,05$ ) kui katmata maapinnal kasvavatel puudel. Seejuures puude vanuse kasvades erinevused ESP osas kilel ja katmata maapinnal kasvavate puude vahel vähenesid. Seitsmendal ja kaheksandal kasvuaastal ei olnud puude ESP usaldatavalt erinev ( $p > 0,05$ ) (joonis 3B).

Arvestades kultuuride mullatingimusi, oli arukaskede kõrguskasv multšimata mullal parem kahkjäl mullal, leostunud mullal, leetjal mullal ja gleimullal. Kaheksa kasvuaasta jooksul on kõige aeglasem kasv arukaskedel olnud rähksel mullal (tabelid 1 ja 2). Uuritud kultuurides ei leitud selget seost katmata maapinnal kasvanud kaskede kaheksa esimese kasvuaasta kõrgus- ja jämeduskasvu ning mulla huumushorisondi NPK sisalduse vahel, kuigi arukaskede kõrguse juurdekasv kaheksa kasvuaasta jooksul oli suurim kultuurides, kus huumushorisondis olid kõrged N, P ja K kontsentratsioonid, vastavalt  $-1,62 \text{ g kg}^{-1}$ ,  $19 \text{ mg kg}^{-1}$  ja  $127 \text{ mg kg}^{-1}$ . Huumushorisondi happesuse ja puude esimese 8 aasta kõrgus- ( $R = -0,585$ ) ja jämeduskasvu ( $R = -0,636$ ) vahel ilmnas negatiivne korrelatsioon.



**Joonis 3.** Kaskede elusvõra alguse kõrgus (A) ja elusvõra suhteline pikkus (ESP) (B) (keskmised koos 95% usalduspiiridega) kilemultšil ja multšimata mullal.

Tugevaim oli korrelatsioon puu kõrguse juurdekasvu ja eelneva aasta kõrguse vahel gleimullal (Gleysol) ( $R = 0,636$ ) ja nõrgim leostunud mullal (Cambisol) ( $R = 0,468$ ). Jooniselt võib näha, et nooremas eas (kõrgus alla 2 m) jääb kahkjäl- (Podzoluvisol), leostunud- (Cambisol), leetjal- (Luvisol) ja gleimullal (Gleysol) kaskede kõrguse jooksev juurdekasv valdavalt 1 m piiresse. Vanemate ja kõrgemate puude juures võib märgata kõrguse juurdekasvu suurt varieeruvust. Erinevalt teistest muldadest jääb puude kõrguse juurdekasv rähksel mullal (Leptosol) valdavalt alla 0,5 m.



**Joonis 4.** Antud aasta puu aastane kõrguse juurdekasv sõltuvana puu esialgsest kõrgusest lähtudes mullatingimustest.

Kaskede kõrguskasvu analüüsimine viiel põllumullal näitas, et puu aastane kõrguse jooksev juurdekasv on seotud puu kõrgusega eelneval aastal (joonis 4).

## Arutelu

Enamikus uuritud kultuuridest oli kaskede kasv esimese kahe kasvuaasta jooksul kiire. Katmata maapinnal kasvanud puude keskmine H ja D varieerusid kultuurides vastavalt 2,5...7,2 m ja 2,0...6,7 cm. Need andmed on kooskõlas Uri jt [36] tulemustega, kes mõõtis Eestis endisel põllumajandusmaal (*Cumuli-Gleyic Luvisol*) 8 aasta vanuse arukasekultuuri keskmiseks kõrguseks  $5,3 \pm 0,1$  m ja keskmiseks rinnaspindalaks  $3,7 \pm 0,1$  cm. Daugaviete jt [7] andmetel varieerus Lätis ( $56...58^{\circ}\text{N}$ ;  $21...28^{\circ}\text{E}$ ) nelja aasta vanuste arukasekultuuride keskmine kõrgus erinevatel põllumuldadel  $0,5...3,1$  m. Johanssoni [15] andmetel oli Rootsis ( $60^{\circ}10'\text{N}$ ;  $16^{\circ}00'\text{E}$ ) 12-aastaste endisel põllumajandusmaal kasvavate arukasekultuuride keskmine H  $6,7...8,2$  ja D  $4,7...7,0$  cm. Katmata maapinnal kasvanud kaskede keskmine elusvõra alguse kõrgus ja ESP olid uuritud kultuurides vastavalt  $0,2...2,5$  m ja  $68,1...93,3\%$ . Käesolevas töös oli elusvõra alguse kõrgus suurim Rapla kultuuris, kuna suur tihedus ja puude kiire kasv tingis seal võrade kiirema liitumise ja elusokste intensiivse suuremise. ESP mõjutab kaskede kasvu ning on sarnaselt elusvõra alguse kõrgusega seotud puistu tihedusega. Kase külladaseks kasvuks peaks ESP olema üle  $50\%$  [3]. Niemistö arvates tuleks puistutes, kus kaskede ESP langeb alla  $55\%$  hooldusraietega puistut hõredamaks raiuda [24]. Järelikult on analüüsitud 8-aastastes kultuurides kaskede ESP külladane puude kiireks kasvuks ning seetõttu puudub seal hetkel hooldusraie teostamise vajadus. Daugaviete jt Lätis tehtud katsete põhjal on 6...7-aastastes põllumaadele rajatud kasekultuurides ( $2500...3300$  puud/ha) ESP keskmiselt  $75\%$  [7]. Tõenäoliselt mõjutavad puude looduslikku laasumist lisaks puistu tihedusele ka geneetilised faktorid [7; 20].

Käesoleva töö põhjal kiirendas multškile esimestel istutusjärgsetel aastatel arukase kasvu – kilel kasvanud puude D ja H olid pärast 8. kasvuaastat oluliselt suuremad katmata mullal kasvanud puudel (tabel 1). Kilel kasvanud kaskede keskmine kõrgus oli kultuurides (välja arvatud Põlva kultuuris)

9...64% ja D 5...91% suurem kui katmata mullal kasvanud puudel. Paljud autorid on välja toonud kilemultši positiivse efekti erinevate puuliikide varases kasvufaasis [1; 2; 7; 10; 22; 40]. On leitud, et kilemultš tõstab maapinna temperatuuri enda all [9; 22] ja säilitab mulla niiskust [2; 40]. Seega mõjutab temperatuuri ja niiskusesisalduse tõus kilealuses mullas soodsalt puude kasvu kilel, kuigi multši efekt mulla temperatuurile sõltub õhukihi paksusest mulla ja kilemultši vahel ning mullaniiskuse sisaldusest [21]. Võib oletada, et kile mõju on puude kasvule erinevatel muldadel erinev. Negatiivsena tuuakse kirjanduses esile asjaolu, et kilemultš võib suurendada näriliste kahjustuse riski [9; 13; 30]. Erinevalt kõrgusest ja rinnasdiameetrist ei leitud kilel ja katmata mullal kasvanud puude sihvakuse suhte ( $H/D$ ) võrdlemisel olulisi erinevusi. Seega ei muutu multšikilel kasvavad puud kõrguskasvu kiirenemise tagajärjel sihvakamaks ning ei ole põhjust rääkida näiteks lumekahjustuste suurenevast ohust puudele multšikile kasutamisel. Lumekahjustused on Eestis sihvakate tüvedega noortes kaasikutest küllatki sagedaseks probleemiks. Vanemates puistutes, kus on suur sihvakuse suhe, on puud tuulehellad [5]. Kuigi multšikilel kasvanud puud olid kaheksanda kasvuaasta järel oluliselt suuremad katmata mullal kasvanud puudest, ei saa rääkida multšikile püsivast mõjust esimese 8 kasvuaasta jooksul. Selgus, et kile positiivne mõju puude kõrguse juurdekasvule oli aastati erinev ja võrdlemisi lühiajaline – juba 7. ja 8. kasvuaastal ei ole puude kõrguse juurdekasvudes olulist erinevust (joonis 2). Tõenäoliselt muutub puude kasvades multšikilest tähtsamaks puude omavaheline juur- ja valguskonkurents, mis üha rohkem hakkab mõjutama nende kasvu. Kui kaskede kõrguse juurdekasv esimesel 7 kasvuaastal järjest suurenes (joonis 2), siis 8. kasvuaastal (2006) langes see kõikides kultuurides järsult. Seda võib seostada põuase suvega Eestis 2006. aastal. Näiteks, juulis 2006 varieerus sademete hulk üle Eesti 3...51 mm (tavaline aastate keskmine on Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudi andmetel 51...95 mm).

Esimesel kuuel kasvuaastal ei toimud kaskedel märkimisväärset looduslikku laasumist ning elusvõra alguse kõrgus jäi vahemikku 0,2...0,4 m (joonis 3A). Järelikult on esimestel istutusjärgsetel aastatel (2500...3300 puud/ha) kase tüve kvaliteeti võimalik parandada vaid kunstliku laasimist kasutades. Sarnasele tulemusele jõudsid Lätis Daugaviete jt, kelle andmetel algab 6...7-aastastes endisele põllumajandusmaale rajatud arukasekultuurides (2500 kuni 3300 puud/ha) elusvõra tavaliselt 0,3...0,6 m kõrguselt ning märkimisväärset elusokste suremist esimestel aastatel ei toimu [7]. Analüüsitud kultuurides algas intensiivne elusokste suremine seitsmendal kasvuaastal, mida saab põhjendada puude võrde liitumisega ja valgustingimuste halvenemisega võrde all. Kuna kilel kasvavad puud olid võrreldes katmata mullal kasvanud puudega suuremad, siis oli oluliselt kiirem ka nende laasumine kahel viimasel mõõtmisaastal (joonis 3A). Elusokste suremine oli 7. ja 8. kasvuaastal intensiivsem nendes kultuurides, kus 6. kasvuaasta lõpul oli puude keskmine kõrgus 4...5 m. Niemistö andmetel algabki arukasel märkimisväärne elusokste suremine võra allosas siis, kui puud on saavutanud kõrguse 5 m [25]. ESP kasvas esimesel kuuel kasvuaastal nii kilel kui katmata mullal kasvanud puudel (joonis 3B), kuna elusokste suremine oli aeglane ja puude kõrguskasv kiire. Kõikidel puudel toimus märkimisväärne ESP langus 7. ja 8. kasvuaastal, kui algas puude võrde liitumine ja elusokste kiire suremine. Esimesel kuuel kasvuaastal oli kilel kasvanud puude ESP oluliselt suurem, kuna nende võra oli kiirema kõrguskasvu tagajärjel pikem. Võib arvata, et suurem ESP soodustas järgnevatel aastatel ka puude kiiremat kasvu kilel.

Analüüsitud kultuurides oli kaskede kasv kiireim viljakatel parasniisketel muldadel. Aeglane oli kaskede kasv esimesel 8. kasvuaastal Hiiu kultuuris (*Rendzic Leptosol*). Rähksed mullad on põuakartlikud [28; 34], mistõttu puude kasv on neil halbade niiskustingimuste tõttu sageli limiteeritud. Kuna kased on suhteliselt suured veetarbijad [12], võis puude aeglane kasv Hiiu kultuuris olla seotud mulla ebasoodsate niiskustingimustega. Huumushorisoni NPK sisaldus ei mõjutanud uuritud arukasekultuurides puude kasvu esimesel kaheksal kasvuaastal. Seda võib põhjendada uuritud kultuuride vähesusega ning asjaoluga, et enamik neist kasvas viljakal põllumullal. Sarnaselt siinsetele tulemustele ei leitud ka Soomes endisel põllumajandusmaal kasvavate 20-aastaste kasekultuuride analüüsimisel selget suhet mulla viljakuse ja puistu kasvu vahel [39]. Tuginedes kirjandusele, on kased teiste põhjamaiste puuliikidega võrreldes tundlikud mulla füüsikaliste ja

keemiliste omaduste suhtes [12]. Lämmastiku ja kaaliumiga väetades saadi parim positiivne efekt [35; 38]. Kuigi arukask talub väga ulatuslikku mulla happesust [11], on meie kultuurides kase kasv aeglasem lubjarikastel põldudel. Perala ja Alm on avaldanud, et optimaalne mulla happesus arukase puhul on 4,0...5,0 [26].


Vaatlused näitasid, et kaskede aastane juurdekasv sõltub puu eelmise aasta kõrgusest (joonis 4). Üldiselt, mida kõrgem oli puu eelneval aastal, seda suurem oli tema kõrguse juurdekasv järgneval aastal. Suuremate puude juures võib märgata aastase jooksva juurdekasvu suuremat varieeruvust, mida võis põhjustada järjest suurenev konkurents puude vahel ja ebasoodsad kasvutingimused viimasel mõõtmisaastal. Meie tulemused on heas kooskõlas Jõgiste jt [17] töö tulemustega, mille järgi väheneb kasenoorendikes vanuse kasvades puu suuruse mõju aastasele kõrguse juurdekasvule.


## Märkus

Autor avaldab suurt tänu juhendajatele dr Aivo Varesele ja dots Veiko Urile, kes olid suureks abiks käesoleva töö valmimisel.

## Kirjandus

1. Adams, J. C. (1997) Mulching improves early growth of four oak species in plantation establishment. *South. J. Appl. For.*; 21 (1).
2. Bowersox, T. W. & Ward, W. W. (1970) Black polyethylene mulch - an alternative...mechanical cultivation for establishing hybrid poplars. *Tree Planters' Notes*, 21 (1).
3. Cameron, A. D. (1996) Managing birch woodlands for the production of quality timber. *Forestry*, 69 (4).
4. Chrempínska, Z. (2003) Afforestation – scale and importance of the problem, current state and programme execution. Proceedings of the international conference: *Afforestation in Europe – experiences and prospects* (Poland, 6-8.10 2003).
5. Cucchi, V.; Meredieu, C.; Stokes, A.; Coligny, F.; Suarez, J. & Gardiner, B. A. (2005) Modelling the windthrow for simulated forest stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management*, 213.
6. Daugaviete, M. (2003) Measures for successful afforestation of marginal farmland in Latvia. Proceedings of the international conference: *Afforestation in Europe – experiences and prospects* (Poland, 6-8.10 2003).
7. Daugaviete, M.; Krumina, M.; Kaposts, V. & Lazdins, A. (2003) Farmland afforestation: the plantations of birch *Betula pendula* Roth. on different soils. *Baltic Forestry*, 9 (1).
8. Davies, R. J. (1985) The importance of weed control and use of tree shelters for establishing broadleaved trees on grass dominated sites in England. *Forestry*, 58.
9. Davies, R. J. (1988) Sheet mulching as an aid...broadleaved tree establishment. I. The effectiveness of various synthetic sheets compared. *Forestry*, 61.
10. DeByle, N. V. (1969) Black polyethylene mulch increases survival and growth of a Jeffrey pine plantation. *Tree Planters' Notes*, 19.
11. Evans, J. (1984) Silviculture of broadleaved woodland. *For. Comm. Great Britain Bull.*; 62.

- 
12. Ferm, A. (1993) Birch production and utilization for energy. *Biomass and Bioenergy*, 4 (6).
  13. Ferm, A.; Hytönen, J.; Lilja, S.; Jylhä, P. (1994) Effects of weed control on the early growth of *Betula pendula* established on an agricultural field. *Scand. J. of For. Res.*; 9.
  14. Herajärvi, H. (2001) Technical properties of mature birch (*Betula pendula* and *B. pubescens*) for saw milling in Finland. *Silva Fenn.*; 35.
  15. Johansson, T. (2007) Biomass production and allometric above-ground relations for young birch stands planted at four spacings on abandoned farmland. *Forestry*, 80(1).
  16. Jõgiste, K.; Vares, A. & Sendros M. (2003) Restoration of former agricultural fields in Estonia: comparative growth of planted and naturally regenerated birch. *Forestry*, 76 (2).
  17. Jõgiste, K.; Vares, A.; Uri, V. & Tullus, H. (2005) Baltic afforestation. In: Stanturf J.A. & Madsen P. (eds.). *Restoration of boreal and temperate forests*. CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton.
  18. Karlsson, A. (2002) Site preparation of abandoned fields and early establishment of planted small-sized seedlings of silver birch. *New Forests*, 23.
  19. Kullberg, Y. and Bergström, R. (2001). Winter browsing by large herbivores on planted deciduous seedlings in Southern Sweden. *Scand. J. For. Res.*; 16.
  20. Landsberg, J. J. & Gower, S. T. (1997). Applications of physiological ecology...forest management. Academic Press, San Diego.
  21. Liakatas, A.; Clark, J. A.; Monteith, J. L. (1986) Measurements of the heat balance under plastic mulches. *Agric. For. Meteorol.*; 36.
  22. Litzow, M. & Pellett, H. (1983). Influence of mulch materials on growth of green ash. *J. of Arboriculture*, 9 (1).
  23. Mäkinen, H., Ojansuu, R. And Niemistö, P. (2003). Predicting extensional branch characteristics of planted silver birch (*Betula pendula* Roth.) on the basis of routine stand and tree measurements. *For. Sci.*, 49 (2).
  24. Niemistö, P. (1995) Influence of initial spacing and row-to-row distance on the crown and branch properties and taper of silver birch (*Betula pendula*). *Scand. J. For. Res.* 10.
  25. Niemistö, P. (1996) Yield and quality of planted silver birch (*Betula pendula*) in Finland - preliminary review. *Nord. J. Agric. Sci.*; 24.
  26. Perala, D. A. and Alm, A. A. (1990) Reproductive Ecology of birch: a review. *For. Ecol. Manage.*; 32.
  27. Rennols, K.; Geary, D. N. & Rollinson, T. J. D. (1985) Characterising diameter distributions by the use of the Weibull distribution. *Forestry*, 58 (1).
  28. Reintam, L. (1998) Soil genesis, diagnostics and classification. Problems of Estonian soil classification. *Transactions of Estonian Agricultural University*, 198.
  29. Saramäki, J. & Hytönen, J. (2004) Nutritional status and development of mixed plantations of silver birch (*Betula pendula* Roth.) and downy birch (*Betula pubescens* Ehrh.) on former agricultural soils. *Baltic Forestry*, 10 (1).
  30. Siipilehto J. (2001) Effect of weed control with fibre mulches and herbicides on the initial development of spruce, birch and aspen seedlings on abandoned farmland. *Silva Fennica*, 35 (4).

- 
31. Tučeková, A. (2003) Afforestation of non-forest land and land unused in Agriculture in Slovakia again actual. Proceedings of the international conference: *Afforestation in Europe – experiences and prospects* (Poland, 6-8.10 2003).
32. Urbaitis, G. (2003) Tree species composition and growth of the self-regenerated forests and forest plantations on abandoned agricultural land in Lithuania. Proceedings of the international conference: *Afforestation in Europe – experiences and prospects* (Poland, 6-8.10 2003).
33. Uri, V.; Vares, A.; Tullus, H. & Kanal, A. (2007) Above-ground biomass production and nutrient accumulation in young stands of silver birch on abandoned agricultural land. *Biomass and Bioenergy*, 31 (4).
34. Vares, A.; Jõgiste, K. & Kull, E. (2001) Early growth of some deciduous tree species on abandoned agricultural lands in Estonia. *Baltic Forestry*, 7 (1).
35. Vares, A.; Uri, V. & Tullus, H. (2003) Height growth of four fast-growing deciduous tree species on abandoned agricultural lands in Estonia. *Baltic Forestry*, 9 (1).
36. Vares, A.; Uri, V. & Tullus, H. (2003) Deciduous tree species on abandoned agricultural lands in Estonia. Proceedings of the international conference: *Afforestation in Europe – experiences and prospects* (Poland, 6-8.10 2003).
37. Vares, A. (2005) The growth and development of young deciduous stands in different site conditions. The thesis for applying the doctor's degree in agricultural sciences in forestry, Estonian Agricultural University.
38. Viro, P. J. (1974) Fertilization of birch. *Comm. Inst. For. Fenn.*; 81 (4).
39. Yearbook Forest 2005 (2006) Compiled and edited by Centre of Forest Protection and Regeneration. Tartu.
40. Walker, R. F. & McLaughlin, S. B. (1989) Black polyethylene mulch improves growth of plantation-grown loblolly pine and yellow-poplar. *New Forests*, 3.



# Paju-pigirooste (*Melampsora epitea*) suvieslate arvukus Eesti energiavõsa istanduste erinevatel pajukloonidel

Merje Toome

Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituut

Seoses fossiilsete kütuste hinnatõusuga 1970. aastatel hakati alternatiivse kütuseallikana kasvatama kiirekasvulisi lehtpuid selleks spetsiaalselt rajatud istandustes [22; 18]. Tänapäeval kasutatakse energiavõsadeist saadud puitu energiaallikana nii elektrijaamades, katlamajades kui ka väiksemates majapidamistes. Sellised kiirekasvulised võsad on laialt levinud näiteks Suurbritannias, Rootsis [16; 22; 40], Kanadas ja Saksamaal [41]. Põhja-Euroopas on kiirekasvulistest lehtpuudest sobivaimaks paju (*Salix* sp. L.) [18] ning enamasti kasvatatakse vitspaju (*S. viminalis* L.) ja pikalehelise paju (*S. dasyclados* Wimm.) kloone [3; 16]. Lisaks taastuva energia tootmisele saab kiirekasvulisi puid kasutada ka vegetatsioonifiltritena reoveepuhastites [2; 36], kus reovesi asendab toitaineveaestele muldadele rajatud istandustes vajaminevaid mineraalväetisi [6]. Lisaks toitaineitele tagab reovee pidev juurdevool vajaliku niiskuse ning pajud kasvavad oluliselt kiiremini kui põllumaale rajatud samaealistes istandustes [15; 35]. Reoveepuhastites asuvatest istandustest saadavat puitu saab samuti kasutada kohalikes katlamajades kütusena, mis võrreldes fossiilsete kütustega saastab õhku tunduvalt vähem [2; 22].

Energiavõsad kui monokultuurid on ohustatud mitmete haiguste ja kahjurite poolt. Neist kõige levinumad ja suurimate kahjustuste tekitajad on pigirooste perekonna *Melampsora* liigid [25; 27; 41]. Perekond *Melampsora*, mille enamus liike parasiteerib pajul, haaval või paplil [30; 34], kuulub roosteliseladsete seltsi, mille esindajad on õistaimede obligatoorsete parasiitidena kõige suuremat majanduslikku kahju tekitavad kandseened [4]. Pajudel levinud pigirooste liigid nakatavad peamiselt lehti, kuid võib esineda ka paju tüve kahjustav vorm [28; 31]. Eriti vastuvõtlik on pikalehine paju [5; 26], kuid ka vitspaju pole kahjustustest vaba [3; 31; 42].

Paju-pigirooste (*M. epitea*) vähendab kogu taime fotosünteesi efektiivsust, eriti haiguspuhangu lõppjärgus, vähendades oluliselt taimelehtede fotosünteesivast pinda [1; 39] ja seega ka istandustest saadavat biomassi. Lisaks sellele takistab seenpatogeen oluliselt pajude ettevalmistumist talveks, suurendades sellega pajude külmakahjustusi [5; 16]; roostekahjustustele järgneval aastal jäävad kahjustatud puud valguskonkurentsis alla tervetele ning sageli hukkuvad [20; 22; 48]. Roosteseenega juba nakatunud paju on sama kasvuperioodi jooksul ligi kaks korda vastuvõtlikum järgnevale pigirooste rünnakutele ja ka teistele seenpatogeenidele [44]. McCracken ja Dawson [19; 21] on oma uurimustes näidanud, et pajulehtede roostega nakatuvus tõuseb märgatavalt septembris, saavutades maksimumi enne lehtede varisemist. Kuna paju kasvab ka septembris [24; 42], võib seen rohke esinemise korral oluliselt vähendada energiavõsast saadavat biomassi [23]. Tugeva kahjustuse korral võib puidu saagikus väheneda kuni 40% [22; 33].

Pajuistandustes pigirooste tõrjeks fungitsiide ei kasutata, sest see on liialt kulukas, suure istutustiheduse korral raskesti läbiviidav ning keskkonda saastav [22]. Alternatiivseks võimaluseks on kasutada monokultuuride asemel istutusskeemi, kus erinevad kloonid paiknevad läbisegi. Segaiistandused jälgendavad looduses esinevat liigilist mitmekesisust ja nende efektiivsus seisneb sama klooni taimede füüsilises eraldamises üksteisest [26]. Istanduste rajamisel peab hoolikalt kaaluma, milliseid kloone kasutada, sest mida resistentsemad või tolerantsemad on kloonid patogeeni suhtes, seda vähem esineb saagikadu [9; 29; 31; 38; 45]. Lisaks resistentsele peab kloon säilitama kõrge saagikuse ning vastupidavuse külmakahjustustele [5; 16; 20], mistõttu on täielikku resistentsest pigirooste vastu peaaegu võimatu saavutada [3; 37].

Käesoleva uurimustöö eesmärgid olid: 1) määrata kindlaks erinevate pajukloonide vastuvõtlikkus paju-pigiroostele (*M. epitea*) Eesti tingimustes, et leida sobiv istutusmaterjal uute istanduste rajamiseks; 2) hinnata kasvuaasta ja -koha mõju pigirooste arvukusele erinevate istanduste abil; 3) teha kindlaks, kuidas mõjutavad lisatoitained taimede resistentisust roosteseene suhtes.

## Materjal ja metoodika

Käesolevaks uurimuseks koguti andmeid Saare, Nõo ja Kambja pajuistandustest. Proovialadel kasvavad pajukloonid on aretatud ja välja valitud Rootsis ning kannavad Rootsi Pajude Sordiaretuse Programmi koodi (Koppel *et al.*; 1996). Antud uurimustöös kasutati kolme vitspaju (*S. viminalis*) kloonid (78021, 78183 ja 78195) ja ühte pikalehise paju (*S. dasyclados*) kloonid (81090). Edaspidi on kasutatud kloonidele antud koodide kolme viimast numbrit.

Saare istandus rajati eksperimentaalse energiavõsana 1993. aasta maikuu ning asub 45 km Tartust kirdes, endisel rohumaal [12]. Taimede istutustihedus on 20 000 taime/ha ning kuni 2002. aastani väetati pooli istanduse katseruute lämmastiku (200 kg/ha), fosfori (25 kg/ha) ja kaaliumiga (50 kg/ha), ülejäänud olid kontrollruudud. Pajutüved koristati istandusest 1998. ja 2003. aastal, seega olid uuritud taimede võrsed 2003. aastal üheaastased ja 2004. aastal kahe aasta vanused. Nõo katseala asub 15 km Tartust lõunas, tasasel avamaal, mida varem kasutati põllumaana. Käesolev uurimustöö viidi läbi istanduse 1995. aastal rajatud 1,0 ha suuruses osas, kus pajud kasvavad istutustihedusega 20000 taime/ha. Iga kloon kasvab 45x29 m<sup>2</sup> suurusel alal [12]. Istandus koristati okstest 2001. aastal ning seega olid 2003. ja 2004. aastal uuritud taimede oksad vastavalt kolme ja nelja aasta vanused. Kambja pajuistandus on rajatud 2003. aastal Kambja aleviku reoveepuhasti ühe osana. Istandus koosneb kolmest osast, millest üks on kontrollala ja teisi pritsitakse erineva hulga reoveega [7]. Taimede istutustihedus on 14800 taime/ha ning antud uurimuses kasutati kontrollala ja suurema reoveehulgaga istanduse osa. 2004. aasta sügisel olid taimed reoveepuhastis kahe aasta vanused.

Saare ja Nõo energiavõsades tehti välitöid 2003. ja 2004. aasta septembris, sest selleks ajaks on pigiroostel olnud aega taimedel levida ning samas pole massiline lehelangus veel alanud [16; 43]. Saarel korjati lehti alati nelja kloonid ühest väetatud ja ühest väetamata ruudust ning mõlemal aastal kasutati lehti sama kloonid/väetustaseme samadest ruududest. Nõo istanduses kasutati lehtede kogumiseks samuti nelja erineva kloonid ruute, kuid selles istanduses kasvavad taimed olid kõik jäetud lisatoitaineteta. Kambja istanduses võeti proove vaid 2004. aasta septembris ning lehti korjati nii kontroll- kui ka reoveega töödeldavalt alalt. Kambjas korjati lehti ainult kolmelt kloonilt, kuna kloonid 195 ei ole sinna istutatud.

Kuna paju võra alumises osas kasvavad vanemad lehed on roostega rohkem nakatunud [3; 19; 32; 46], kasutati käesolevas uurimuses ainult alumisi täiskasvanud lehti. Igalt uuritavalt prooviruudult valiti juhuslikult viis võrset, mille võra alumisest osast korjati juhuslikult 15 lehte. Seega analüüsiti igast ruudust kokku 75 lehte. Istandustest kaasa korjatud lehed pandi viiekaupa märgistatud pabervoldikute vahele ja kuivatati EPMÜ Zoologia ja Botaanika Instituudi labori kuivatuskapis 65 °C juures kaks ööpäeva. Kuivatatud lehtedelt loeti stereomikroskoobi abil pigirooste suvieslate arv ning kõikidest lehtedest, millel leidis eoslaid, tehti valguskoopiad, mis hiljem skaneeriti. Saadud kujutiste pindalad mõõdeti kasutades Indrek Kalamehe poolt 1994. aastal koostatud programmi Pindala v.1.0. Mõõdetud pindalade abil arvutati keskmine eoslate arv lehe pinnaühiku kohta (pustulite arv lehel / lehe pindala).

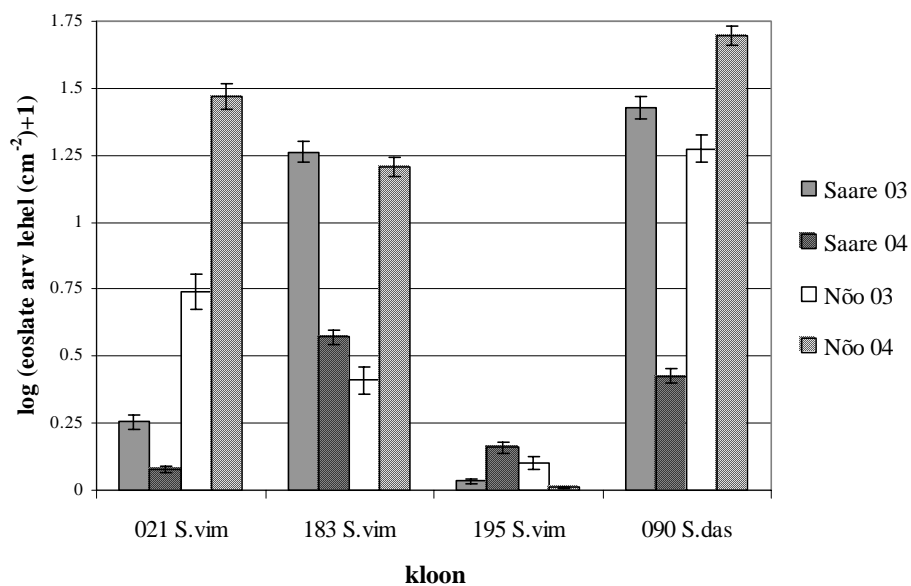
Uurimustöö andmestik sisaldas rohkelt sisuka väärtusega nulle, mis tähendas, et lehed ei olnud pigiroostega nakatunud. Sellest tulenevalt ei olnud andmed normaaljaotusega ning parameetriliste analüüsimeetodite eeldused olid rikutud. Kuna andmestik oli fikseeritud faktorite, sõltumatute vaatluste, juhusliku valimi ning suure valimimahuga, võis siiski kasutada dispersioonanalüüsi

usaldusnivooga 0,01 [13; 14]. Ühtlustamaks jääkide dispersioone, transformeeriti andmed logaritmimise teel:  $n' = \log (n / S + 1)$ , kus  $n$  – eoslate arv lehel ja  $S$  – lehe pindala. Dispersioonanalüüsiga saadud tulemuste usaldusväärsuse kontrollimiseks analüüsiti sama andmemassiivi ka mitteparameetrilise GENMOD paketiga, mis andis ANOVA-le sarnased tulemused. Erinevate faktorite mõju eoslate arvule lehepinnal analüüsiti programmi SAS 8.02 üldiste lineaarsete mudelite abil. Istanduse, proovivõtuaja, -aasta ja väetamise mõju erinevatele pajukloonidele leiti vähimruutude meetodi abil ning erinevate kloonide ja istanduste võrdlemiseks kasutati Tukey testi.

## Tulemused ja arutelu

Pigirooste eoslate arvukus lehepinnal sõltus kasvuaastast. Saare istanduses oli 2003. aastal korjatud lehtedel rohkem suvieoslaid kui 2004. aastal (mõlemal juhul  $p < 0,001$ ), Nõo istanduses aga vastupidi ( $p < 0,001$ ) (joonis 1). Erinevused kasvuaastade vahel on enamasti põhjustatud ilmastikust, kusjuures suuremad kahjustused arenevad välja niiske ning jaheda varasuve korral [37; 42]. Selline ilm soodustab pajude nakatumist, sest eosed vajavad idanemiseks tilkvee olemasolu ning taime tungimiseks lahtiseid õhulõhesid [4; 8]. Lisaks mikrokliimaatilistele tingimustele sõltub roostekahjustuste hulk ka paju ning patogeeni vaheperemeestaime omavahelisest kaugusest. Ramstedt näitas oma uurimuses, et vaheperemeestaime lehise vahetus läheduses kasvavatel pajudel toimub nakatumine ligi kuu aega varem kui nendes istandustes, kus lehiseid lähedal ei ole. Väga oluline on esmase nakatumise aeg, sest mida varem moodustuvad esimesed eoslad, seda suuremad kahjustused kujunevad välja vegetatsiooniperioodi lõpuks [37]. Kuna antud töö käigus ühtegi lehist uuritavate istanduste vahetust lähedusest ei leitud, puudub hetkel informatsioon, kui kaugelt eosed ühte või teise istandusse saabusid. Kuid kogutud andmete põhjal on alust eeldada, et Saare istandusele võiksid lehised paikneda lähemal kui Nõo istandusele.

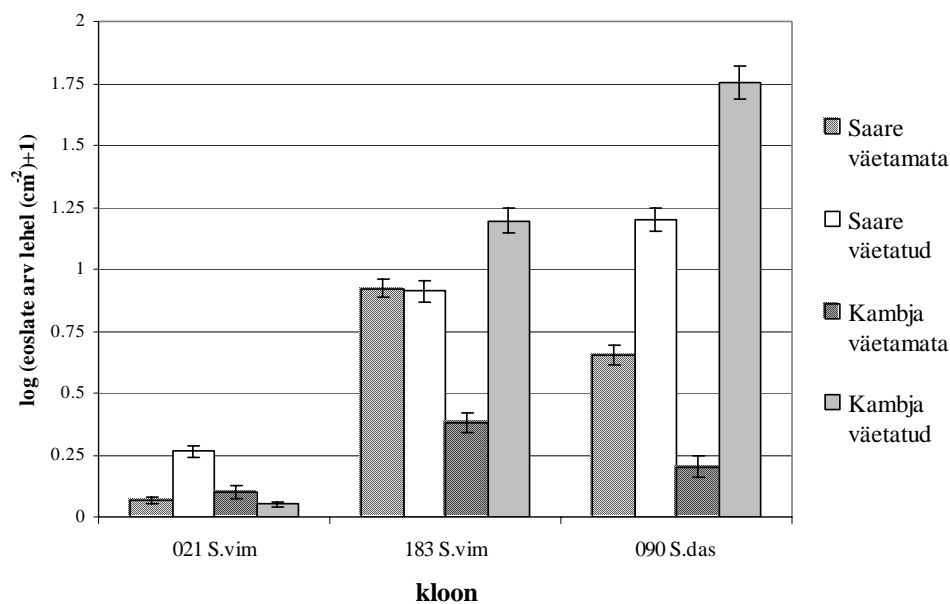
2003. aasta maikuu sajune ja keskmisest soojem ilm [10] oli ideaalne roosteseene idanemiseks ja levikuks. Kuna järgnevad kaks kuud olid jahedamad ning kuivemad, toimus Saare istanduses taimede esmane nakatumine ilmselt just maikuu ning eoste lokaalse leviku tagajärjel arenesid sügiseks välja suuremad kahjustused. Nõo energiavõsasse võisid sellel aastal esimesed roosteesed jõuda aga alles juunikuus, kui ilmastikutingimused olid idanemiseks ebasoodsad ning seetõttu olid lõplikud kahjustused seal väiksemad. 2004. aasta maikuu oli aga vastupidiselt eelnevale aastale jahedam ning kuivem [11], sellega võib seletada Aarikese ning Saare istanduse väiksemat nakatumise taset, võrreldes eelnenud aastaga. Juunikuu oli 2004. aastal keskmisest niiskem ning jahedam, millest võis olla tingitud eoslate suur arvukus Nõo istanduses (joonis 1).



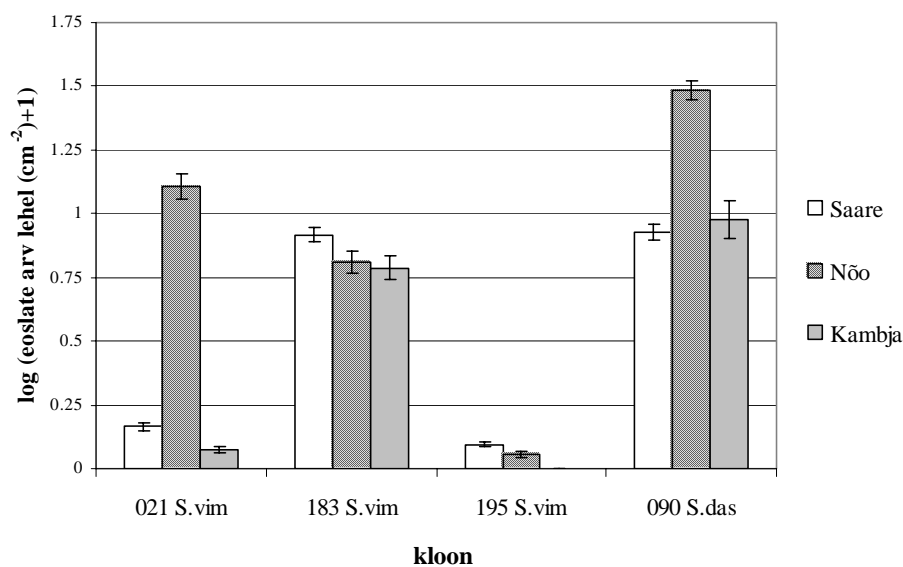
**Joonis 1.** Keskmise pigirooste suvieslate arvukus lehel (logaritm-transformeeritud) erinevatel kloonidel Saare ja Nõo istandustes, keskmistele on lisatud standardvead. Keskmiste arvutamisel on kasutatud nii väetatud kui väetamata taimede andmeid. S.vim – *Salix viminalis*; S.das – *S. dasyclados*.

Nii Saare kui ka Kambja istanduses suurendas vastavalt reoveega pritsimine ja mineraalne väetamine enamasti oluliselt eoslate arvukust lehtedel (mõlemal juhul  $p < 0,001$ ), kuigi Saare istanduses väetati taimi viimati 2002. aasta kevadel. Saare istanduses olid septembris korjatud väetatud ja väetamata taimede lehed sarnaselt palju nakatunud vaid klooni 183 puhul, teiste kloonide puhul suurendas väetamine oluliselt pigirooste arvukust ( $p < 0,001$ ). Kambja istanduses ei mõjutanud reoveega kastmine vaid klooni 021 vastuvõtlikkust (nende omavahelise erinevuse kohta  $p > 0,1$ ) (joonis 2). Kuna mõlema töötlemise käigus lisati kasvupinnasesse toitaineid, võib järeldada, et paremates kasvutingimustes nakatuvad taimed pigiroostega rohkem kui kehvades tingimustes. Suurem vastuvõtlikkus roosteseene suhtes võib olla põhjustatud muutustest rakukesta ehituses [23] või moodustuvate suvieslate arvust. Eelnevatest uuringutest on selgunud, et väetatud taimede lehtedel on suuremad suvieslad [47], mis sisaldavad alati rohkem eosid [19]. Samas tõestati ka, et suuremate eoslatega lehtedel oli rohkem eoslaid. Varem on tõestatud, et toitainete ja vee piisava kättesaadavuse korral ei investeerita taim nii palju rakukestade ehitusse ja kaitsekemikaalide tootmisesse, kui vaesematel muldadel kasvades [23], mistõttu need taimed on roosteseene kahjustustele palju vastuvõtlikumad. See asjaolu selgitab ka suuremaid roostekahjustusi Kambja reoveepuhastis.

Kõiki andmeid omavahel võrreldes erines pigirooste eoslate ohtrus erinevates istandustes. Sarnaste tulemusteni on jõutud varem ka Rootsi [37] ja Inglismaa istandustes [31]. Kõige rohkem nakatunud taimed kasvasid Nõo istanduses ( $p < 0,001$ ) (joonis 3). Sealsete pajude suhteliselt suurt nakatumist võib seletada asjaolu, et selles istanduses kasvasid teiste võsade võrreldes kõige vanemad oksad. Kirjandusest on teada, et vanematel võrsetel on rohkem eelmiste aastate külmakahjustusi, mis muudavad pajud roosteseenele vastuvõtlikumaks [16]. Siiski tuleks võrse vanuse mõju kohta teha täiendavaid uuringuid, sest kaheaastase välikatse andmetest ei piisa üldiste järelduste tegemiseks. Saare ja Kambja istanduses olid lehed sarnaselt vähem nakatunud (nende omavahelise erinevuse kohta  $p = 0,03$ ) (joonis 3). Ka nende istanduste puhul võiks oletada okste vanuse mõju roosteseene arvukusele, sest mõlemas istanduses kasvasid 2004. aastal kahe aasta vanused võrsed, millel oli vähem eelnevate aastate kahjustusi. Samal ajal võivad erinevused roosteseene kahjustustes olla põhjustatud ka vaheperemeestaime ja istanduse vahelisest kaugusest.



**Joonis 2.** Keskmise pigirooste suvieslate arvukus (logaritm-transformeeritud) kolme kloori väetatud ja väetamata taimede lehtedel Saare ja Kambja istandustes, keskmistele on lisatud standardvead. S.vim – *Salix viminalis*; S.das – *S. dasyclados*.



**Joonis 3.** Keskmise pigirooste suvieslate arvukus lehel (logaritm-transformeeritud) erinevatel kloonidel kolmes uuritud istanduses, keskmistele on lisatud standardvead. Tulba puudumine kloonil 195 tähendab, et Kambja istanduses seda pajuklooni ei kasvanud. Keskmiste arvutamisel on kasutatud nii töödeldud kui töötlemata taimede andmeid. S.vim – *Salix viminalis*; S.das – *S. dasyclados*.

Käesolevast uurimusest selgus, et uuritud pajuklooni olid roosteseene suhtes väga erineva resistentsusega, samuti mõjutas väetamine, kasvuaasta ja kasvukoht erinevaid kloori erinevalt. Kõigist uuritud pajukloonidest oli vitspaju kloon 195 roosteseenele kõige resistentsem (keskmiselt vaid 0,68 eoslat  $\text{cm}^{-2}$ ) ( $p < 0,001$ ). Rootsi kasvutingimustes läbi viidud uuringute andmetel peaks kloonid 195 ja 021 olema sarnase resistentsusega [17]. Vaatamata heale vastupidavusele pigirooste suhtes, ei kasutata kloon 195 taimi enam uute istanduste rajamisel, kuna see kloon on Eesti kliimatingimustes märgitud külmaõrnaks [7]. Uuritud kloonidest oli kloon 021 (keskmiselt 5,77 eoslat  $\text{cm}^{-2}$ ) rohkem nakatunud kui kloon 195 ja vähem nakatunud kui kloonid 183 ning 090 ( $p < 0,001$ ). Nõo energiavõimas oli 2004. aastal kloori 021 taimede lehtedel ligi viis korda rohkem suvieslaid kui

2003. aastal ( $p < 0,001$ ) (joonis 1). Reoveega pritsimine selle pajuklooni lehtedel pigirooste eoslate arvukust oluliselt ei mõjutanud ( $p = 0,9$ ) (joonis 2). Seetõttu tuleks järgnevatel aastatel kindlasti jätkata reoveega pritsitud kloon 021 taimedel roosteseene arvukuse hindamist, sest esimese aasta tulemuste andmetel võib see kloon olla Eesti tingimustes sobiv reoveepuhastites kasvatamiseks.

Kõigist uuritud pajulehtedest leidis kloon 183 lehtedel (keskmiselt  $29,97$  eoslat  $\text{cm}^{-2}$ ) vähem suvieoslaid kui kloonil 090, kuid rohkem kui kloonidel 021 ja 195 ( $p < 0,001$ ). Kambja istanduses oli kloon 183 ülejäänud kahe klooniga võrreldes keskmiselt nakatunud ja pajude töötlemine reoveega suurendas suvieoslate arvu lehe pinnal ligi kümme korda ( $p < 0,001$ ) (joonis 2). Vaatamata suhteliselt suurele vastuvõtlikkusele roosteseene suhtes on kloon 183 üks Rootsi energiavõsades kõige enam kasvatatud kloonidest tänu heale saagikusele ja külmakindlusele [16]. Ainsa uurimuses kasutatud pikalehise paju kloon (090) lehtedel oli kõigis istandustes kõige rohkem suvieoslaid (keskmiselt  $53,93$  eoslat ruutsentimeetril) ( $p < 0,001$ ). Kirjandusest on leitud, et tegemist on sama tundliku klooniga, kui seda on kloon 183 [17]. Saare istanduses olidki kloon 090 lehed keskmiselt sama nakatunud kui kloon 183 omad (nende omavahelise erinevuse kohta  $p = 0,9$ ). Vaadeldes aga eoslate arvukust erinevatel aastatel, selgus et 2003. aastal oli kloon 090 rohkem nakatunud kui kloon 183 ja 2004. aastal vastupidi (mõlemal juhul  $p < 0,001$ ) (joonis 1). Selline kasvuaastade vaheline erinevus näitab, et kloonide resistentsus sõltub tugevalt erinevate aastate ilmastikutingimustest. Kambja reoveepuhastis oli see pajukloon roosteale kõige vastuvõtlikum ja reoveega pritsitavad taimed olid võrreldes kontrolltaimedega väga tugevalt nakatunud ( $p < 0,001$ ) (joonis 2). Kui edaspidiste uuringute käigus selgub, et reoveega pritsitud pajud on ka järgnevatel aastatel tugevalt roosteseene poolt kahjustatud, tuleks uute puhastite rajamisel kaaluda selle kloon kasvatamisest loobumist.

Roostekahjustuste vähendamiseks on soovitatav uutes rajatavates pajuistandustes kasvatada mitmeid erinevaid kloonide läbisegi, sest selline istutusskeem aitab oluliselt vähendada pigirooste kahjustusi [22]. Sealjuures tuleks istutamiseks valida just sellised kloonid, mis kohalikes tingimustes oleksid leherooste suhtes vähem vastuvõtlikud. Pikas perspektiivis on segakultuuride kasutamine tõhusam, kui antud hetkel resistentsete kloonide kasvatamine monokultuuridena, sest rooste muutub aastate jooksul erinevate kloonide suhtes virulentsemaks [37; 45].

## Kokkuvõte

Käesoleva uurimustöö eesmärgiks oli hinnata pigirooste ohtrust erinevatel pajukloonidel kolmes Eesti istanduses. Töö käigus hinnati eoslate arvukust taastuva energia saamiseks rajatud Saare ja Nõo energiavõsa istandustes ning Kambja reoveepuhastis. Ohtruse hindamiseks leiti istandustest kaasa kojatud pajulehtedelt suvieoslate arv lehe pinnaühiku kohta. Roosteseene hulk lehtedel sõltus oluliselt pajukloonist, kusjuures roosteseenele kõige vastuvõtlikum oli pikalehise paju (*S. dasyclados*) kloon 81090, järgnesid vitspaju (*S. viminalis*) kloonid 78183, 78021 ja 78195. Lisaks kloonile sõltus taimede nakatumus ka istandusest, proovivõtuaastast ja toitainete lisamisest. Reoveega pritsimine ja väetamine suurendas enamasti pajulehtede roostekahjustusi, kuigi kloon 78021 näis olevat vähem mõjutatud kui teised kloonid. Käesoleva uurimustöö tulemusena võib roosteale vastupidava pajukloonina soovitada kloon 78021. Kuigi ka kloon 78195 oli pigirooste suhtes üsna resistentne, ei saa seda uute istanduste rajamisel kasutada, kuna see pajukloon on külmaõrn. Edaspidi tuleks pigirooste arvukust Eesti tingimustes hinnata ka uuematel kloonidel, mis on Põhjamaades näidanud head vastupidavust pigirooste suhtes. Samas tuleks jätkata antud uurimuses kasutatud kloonide jälgimist, sest roosteseene levik on tugevalt mõjutatud kasvuaasta ilmastikutingimustest.

## Tänuavaldused

Autor tänab uurimustöö valmimisel suureks abiks olnud juhendajaid Katrin Heinsood ja Anne Luike, proove koguda aidanud Triin Tilgerit ja Siret Tappot ning nõuannete eest statistilisel andmetöötlusel Kadri Lõbusat, Toomas Tammaru ja Leho Tedersood. Uurimustöö valmis ETF grant 4831 osalisel toetusel.

## Kirjandus

1. Agrios, G. N. (1997) Plant Pathology, 4<sup>th</sup> edition. Academic Press, USA. 63-112
2. Aronsson, P.; Perttu, K. (2001) Willow vegetation filters for wastewater treatment and soil remediation combined with biomass production. *Forestry Chronicle* **77**, 293-299
3. Åhman, I. (1998) Rust scorings in plantation of *Salix viminalis* clones during ten consecutive years. *European Journal of Forest Pathology* **28**, 251-25
4. Alexopoulos, C. J.; Mims, C. W.; Blackwell, M. (1996) Introductory Mycology, 4<sup>th</sup> edition. John Wiley & Sons, Inc.; USA. 598-638
5. Gullberg, U.; Rytman, H. (1993) Genetics of field resistance to *Melampsora* in *Salix viminalis*. *European Journal of Forest Pathology* **23**, 75-84
6. Heinsoo, K.; Sild, E.; Koppel, A. (2001) Pajuistandused energiaallikana ja vegetatsioonifiltrina. Kogumikus: Tiit, V. (toim) Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine. Teise konverentsi kogumik. Eesti Põllumajandusülikooli Kirjastus, Tartu. 32-38
7. Heinsoo, K.; Sild, E.; Koppel, A. (2002) Estimation of shoot biomass productivity in Estonian *Salix* plantations. *Forest Ecology and Management* **170**, 67-74
8. Hurtado, S. P. (2001) Host specificity and genetic differentiation of *Melampsora epitea* (rust on willow). Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Agraria 278. 9-45
9. Johansson, L. K.-H.; Alström, S. (2000) Field resistance to willow leaf rust *Melampsora epitea* in inter- and intraspecific hybrids of *Salix viminalis* and *S. dasyclados*. *European Journal of Forest Pathology* **106**, 763-769
10. Keppart, L. (2003) 2003. aasta agrometeoroloogilised tingimused Jõgevamaal. URL: [www.jpbi.ee/index.php/463/](http://www.jpbi.ee/index.php/463/) [10.10.07]
11. Keppart, L. (2004) 2004. a. taimekasvuperioodi ilmast. URL: [www.jpbi.ee/index.php/506/](http://www.jpbi.ee/index.php/506/) [10.10.07]
12. Koppel, A.; Perttu, K.; Ross, J. (1996) Estonian energy forest plantations - General information. Kogumikus: Perttu, K.; Koppel, A. (toim) Short Rotation Willow Coppice for Renewable Energy and Improved Environment. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. 15-42
13. Krebs, C. J. (1999) Ecological methodology, 2<sup>nd</sup> edition. Addison-Welsey Educational Publishers, Inc.; USA. 542-551
14. Kriisa, T. (2002) Dispersioonanalüüsi eelduste mõju F-testile. Tartu Ülikool Matemaatilise Statistika Instituut, Tartu
15. Kuusemets, V.; Mäuring, T. (1996) Wastewater purification in a willow plantation. The case study at Aarike. Kogumikus: Perttu, K.; Koppel, A. (toim.) Short Rotation Willow Coppice for Renewable Energy and Improved Environment. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. 159-165

16. Larsson, S. (1998) Genetic improvement of willow for short-rotation coppice. *Biomass and Bioenergy* **15**, 23-26
17. Ledin, S.; Alriksson, A. (1992) Handbook on how to grow short rotation forests. Swedish University of Agricultural Sciences, Section of Short Rotation Forestry, Uppsala.
18. Makeschin, F. (1999) Short rotation forestry in Central and Northern Europe – introduction and conclusions. *Forest Ecology and Management* **121**, 1-7
19. McCracken, A. R.; Dawson, W. M. (1992) Clonal response in *Salix* to *Melampsora* rusts in short rotation coppice plantations. *European Journal of Forest Pathology* **22**, 19-28
20. McCracken, A. R.; Dawson, W. M. (1996) Interactions of willow (*Salix*) clones grown in polyclonal stands in short rotation coppice. *Biomass and Bioenergy* **10**, 307-311
21. McCracken, A. R.; Dawson, W. M. (1997) Growing clonal mixtures of willow to reduce effect of *Melampsora epitea* var. *epitea*. *European Journal of Forest Pathology* **27**, 319-329
22. McCracken, A. R.; Dawson, W. M. (1998) Short rotation coppice willow in Northern Ireland since 1973: development of the use of mixtures in the control of foliar rust (*Melampsora* spp.). *European Journal of Forest Pathology* **28**, 241-25
23. Mitchell, C. P.; Stevens, E. A.; Watters, M. P. (1999) Short rotation forestry – operations, productivity and costs based on experience gained in the UK. *Forest Ecology and Management* **121**, 123-136
24. Nilsson, L.-O.; Ericsson, T. (1985) Seasonal patterns of growth and nutrient uptake in willow. Kogumikus: Nilsson, L.-O. 1985. Growth and Yield of Willow Stands in Relation to Climate and Nutrition. Raport 21, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. 128-141
25. Nordh, N.-E. (1994) Rotation period – from cutting to harvest. Kogumikus: Ross, V. (koost.) Energiavõsa – kasvatamine ja kasutamine. Konverentsi materjalid, Tartu. 30-33
26. Peacock, L.; Hunter, T.; Turner, H.; Brain, P. (2001) Does host genotype diversity affect the distribution of insect and disease damage in willow cropping systems? *Journal of Applied Ecology* **38**, 1070-1081
27. Pei, M. H.; Royle, D. J.; Hunter, T. (1993) Identity and host alternation of some willow rusts (*Melampsora* spp) in England. *Mycological Research* **97**, 845-85
28. Pei, M. H.; Royle, D. J.; Hunter, T. (1995) A comparative study of stem- and leaf-infecting forms of *Melampsora* rust on *Salix viminalis* in the U.K. *Mycological Research* **99**, 357-363
29. Pei, M. H.; Royle, D. J.; Hunter, T. (1996) Pathogenic specialization in *Melampsora epitea* var. *epitea* on *Salix*. *Plant Pathology* **45**, 679-690
30. Pei, M. H.; Hunter, T.; Royle, D. J. (1999) Host-pathogen relationship between *Salix* and *Melampsora* sheds light on the parentage of some biomass willows. *New Phytologist* **141**, 155-160
31. Pei, M. H.; Hunter, T.; Ruiz, C. (1999) Occurrence of *Melampsora* rusts in biomass willow plantations for renewable energy in the United Kingdom. *Biomass and Bioenergy* **17**, 153-163
32. Pei, M. H.; Ruiz, C.; Hunter, T.; Arnold, G. M.; Bayon, C. (2002) Quantitative relationships between inoculum of *Melampsora larici-epitea* and corresponding disease on *Salix*. *Plant Pathology* **51**, 443-453



33. Pei, M. H.; Hunter, T.; Ruiz, C.; Bayon, C.; Harris, J. (2003). Quantitative inoculation of willow rust *Melampsora larici-epitea* with the mycoparasite *Sphaerellopsis filum* (teleomorph *Eudarlucis caricis*). Mycological Research **107**, 57-63
34. Pei, M. H.; Ruiz, C.; Bayon, C.; Hunter, T.; Lonsdale, D. (2005) Pathogenic variation in poplar rust *Melampsora larici-populina* from England. European Journal of Plant Pathology **111**, 147-155
35. Perttu, K. L. (1993) Biomass production and nutrient removal from municipal wastes using willow vegetation filters. Journal of Sustainable Forestry **1**, 57-70
36. Perttu, K. (1996) Willow vegetation filters: principles, results and economy. Kogumikus: Perttu, K.; Koppel, A. (toim.) Short Rotation Willow Coppice for Renewable Energy and Improved Environment. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. 149-158
37. Ramstedt, M. (1999) Rust disease on willows - virulence variation and resistance breeding strategies. Forest Ecology and Management **121**, 101-111
38. Ramstedt, M.; Hurtado, S.; Åström, B. (2002) Pathotypes of *Melampsora* rust on *Salix* in short-rotation forestry plantations. Plant Pathology **51**, 185-190
39. Robert, C.; Bancal, M.- O.; Ney, B.; Lannou, C. (2005) Wheat leaf photosynthesis loss due to leaf rust, with respect to lesion development and leaf nitrogen status. New Phytologist **165**, 227-241
40. Rosenqvist, H.; Roos, A.; Ling, E.; Hektor, B. (2000) Willow growers in Sweden. Biomass and Bioenergy **18**, 137-145
41. Royle, D. J.; Hubbes, M. (1992) Diseases and pests in energy crop plantations. Biomass and Bioenergy **2**, 45-54
42. Sennerby-Forsse, L.; Johansson, H. (1993) Energiavõsa väike käsiraamat. Stockholm Environment Institute, Eesti TA Zooloogia ja Botaanika Instituut, Tallinn.
43. Sharma, R. C.; Khan, Y.; Sharma, S.; Malhotra, R. (2001) Development of *Melampsora ciliata* rust on nursery-grown poplars in north-western Himalayas. Forest Pathology **31**, 313-319
44. Simon, M.; Hilker, M. (2003) Herbivores and pathogens on willow: do they affect each other? Agricultural and Forest Entomology **5**, 275-284
45. Thrall, P. H.; Burdon, J. J. (2000) Effect of resistance variation in a natural plant host-pathogen metapopulation on disease dynamics. Plant Pathology **49**, 767-773
46. Toome, M. (2003) Pigirootse (*Melampsora* sp.) ohtruse määramine energiavõsana kasvatatavatel pajudel. Harjutustöö, Tartu Ülikool, Mükoloogia õppetool.
47. Toome, M. (2004) Pigirootse (*Melampsora* sp.) ohtruse hindamine kolmes Eesti energiavõsas kasvatatavatel pajudel. Lõputöö, Tartu Ülikool, Mükoloogia õppetool.
48. Verwijst, T. (1993) Influence of the pathogen *Melampsora epitea* on intraspecific competition in mixture of *Salix viminalis* clones. Journal of Vegetation Science **4**, 717-722

# Põhugraanulite tootmistehnoloogia

Mihkel Laur

Eesti Maaülikooli tehnikainstituut

Eesti kütuse- ja energiamajanduse üheks strateegiliseks eesmärgiks on saavutada aastaks 2010 taastuvelektri osakaaluks 5,1% brutotarbimisest [1]. 2004 aastal oli see kõigest 0,6% [2]. Et sellise eesmärgini jõuda, tuleb kasutusele võtta biokütused.

Biokütus on kütus, mis on valmistatud biomassist. Biomassina käsitletakse kehtivas seadusandluses põllumajanduslikke tooteid, kaasa arvatud taimseid ja loomseid aineid, metsandusest saadud toodete, jäätmete ja jääkide bioloogiliselt lagunevat fraktsiooni ning tööstuse- ja olmejäätmete bioloogiliselt lagunevat fraktsiooni [3].

Viimastel aastatel on biokütuste kasutamine pidevalt laienenud. Kaasaegsed biokütuste tootmis- ja põletustehnoloogiad võimaldavad efektiivselt ära kasutada praktiliselt kõiki metsa- ja puidutööstuse jäätmeid. Üha laiemat rakendamist kütusena leiab ka rohtne biomass, näiteks õled [4]. Teraviljapõhk sarnaneb omadustelt puiduga. Eestis koristati 2007. a esialgsetel andmetel 605.500 tonni teravilja, põhku tekkis koristamisel seejuures ligikaudu 810.000 tonni [5]. Eestis on biokütuste kasutuselevõtt muutunud aktuaalseks teemaks. Heaks näiteks on Tamsalu linn, millele hakkas 2007. aasta algusest lisasoojust tootma 850 kW põhukatel [6].

Põhu energeetilise väärtuse kohta on erinevatel aegadel esitatud mitmesuguseid andmeid. Võttes aluseks Eesti 2004. aasta teraviljasaagid ja oletades, et kütteks võiks kasutada ca 25% põhust, tuleks aastaseks koguseks 100.000 t põhku, mille kütteväärtus oleks 400...600 GWh [7]. Eesti praeguse teraviljasaagi korral oleks 25% põhukogusest 200 000 t ja selle kütteväärtus 730...980 GWh. Eestis kasutatakse teravilja kasvatamisel tekkivaid jäätmeid soojusenergia saamiseks väga vähe, kuid käesoleva artikli autori arvates on see laiendamist vääriv valdkond.

Uurimuse eesmärgiks oli põhust tahke biokütuse tootmise tehnoloogia pilootprojekti koostamine ja tehnoloogiliste seadmete eelvaliku tegemine.

## Põhk biokütuse lähtematerjalina

Puidupõhiste kütuste kõrval on teiseks katlamajades kasutamist leidvaks tahkete biokütuste rühmaks õled ja energiahein, mis mõlemad saadakse põllumajanduslikult maalt. Õlgede kuivaine elementaarkoostis ja kütteväärtus ei erine oluliselt puidu vastavatest näitajatest, kuid kütteväärtus on siiski veidi madalam (tabel 2) [4]. Põhku kasutatakse juba aastakümneid mitmel pool edukalt põletusmaterjalina, selle ala esirinnas on Taani, Austria ja Prantsusmaa [7]. Õlgede kuivaine elementaarkoostis on välja toodud tabelis 1. Erinevate viljasortide õlgede kütteväärtused on toodud tabelis 2.

**Tabel 1.** Õlgede kuivaine elementaarkoostis [4]

Elemendi sisaldus kuivaines, %	Vahemik	Keskvärtus
C	45...47	46
H	5,8...6,0	5,9
N	0,4...0,6	0,5
O	39...41	40
S	0,01...0,13	0,08
Cl	0,14...0,97	0,31

**Tabel 2.** Erinevate viljade õlgede tuhasisaldus ja alumine kütteväärtus [4]

Vili	Kuivaine tuhasisaldus, $A_d, \%$	Kuivaine alumine kütteväärtus, $q_{net,d}, \text{MJ/kg}$	Tarbimisaine alumine kütteväärtus 20% niiskuse juures, $q_{net,ar}, \text{MJ/kg}$
Rukis	4,5	17,0	13,6
Nisu	6,5	17,8	13,8
Oder	4,5...5,88	17,4	13,4
Kaer	4,9	16,7	12,9
Keskmiselt	5,0	17,4	13,5

Õlgede omadused sõltuvad tugevasti nii kasvukohast, kasvuajast ja kasvuaja ilmastikust kui ka mullastikust ning väetamisest. Näiteks varakult koristatud vilja õlgede kloorisisaldus on kuni neli korda kõrgem kui hilja koristatud õlgedes, kusjuures maksimaalne Cl sisaldus ulatub isegi kuni 0,97%-ni, soodustades tugevasti küttepindade korrosiooni. Õlgede lendaine sisaldus kõigub piirides 60...70%, mis on veidi madalam kui puidupõhistel kütustel. Tuhasisaldus on õlgedes võrreldes puidupõhiste kütustega kõrge – kuivaine tuhasisaldus jääb piiridesse 4,5...6,5%. Samas võib õlgede tuha sulamistemperatuur olla tunduvalt madalam puidupõhiste kütusetuhkade sulamistemperatuuridest. Rukki, odra ja kaera õlgede pehmenemine algab väga madalatel temperatuuridel (735...840 °C), mida tuleb põletustehnoloogia valikul ja kolde põlemisrežiimi seadistamisel arvestada [4].

Energeetiliselt eesmärgil tasub kasvatada sorte, millel on madal valgusisaldus ja suur tärglisesisaldus, madal väetustarve, pikk kõrs suure põhusaagi saamiseks ning lisaks muidugi ka saagikus, haiguskindlus jne. Teravilja kasvatatakse ka etanooli tootmiseks. Põhu kasutamine energia tootmiseks suurendaks etanooliks kasvatatava teravilja energietilist väärtust veelgi [7].

### Põhu varumine biokütuse tootmiseks

Õlgede praktilise kasutamise suurim probleem on nende väike mahukaal, mis pressimata õlgede korral on ainult 30...40 kg puistekuupmeetri kohta, tehes õlgede ladustamise ja transpordi kalliks. Peamiselt varutakse õlgi pressitud kujul. Teraviljakasvatases on valdavaks muutunud õlgede pressimine erineva suurusega pallideks, mille tihedus ulatub sõltuvalt pressimistehnoloogiast ja pallide mõõtmetest 110...165 kg/m<sup>3</sup> [4]. Tänapäeval kasutavad soojusjaamad ja koostootejaamad peamiselt 500-kilogrammiseid suulpalle. Seeläbi pole veoautode kandevõime maksimaalselt kasutatud, sest need suudaksid transportida kaks korda raskemaid suulpalle. Raskemad põhupallid

tooksid kaasa märgatavalt madalamad transpordi- ja ladustamiskulud ning töötlemiskulutused väheneksid. Kasutuses olevad põhupressid suudaksid pressida kuni 700-kilogrammiseid palle, aga et pressida tonniseid palle, tuleks olemasolevaid masinaid ümber teha või välja arendada uus press [8].

Vaheladude kasutamine, materjalide topelt käitlemine ja transport suurendavad kohaletoimetamiskulusid 10...20%. Samas, vaheladude kasutamine oleks vajalik neile, kes aasta läbi toodavad ja kelle lõppladu ei mahuta kogu vajaminevat materjali. Uuringud on näidanud, et põhu varustussüsteemidel, mis toodavad suuri kantpalle, on oluliselt madalamad transpordikulud kui neil, kes toodavad väikesi kantpalle või rullpalle. Samuti tonniseid suurkantpalle tootes ja teepikkuse kahekordistumisel 80 kilomeetrilt 160-ni suureneb transpordikulu vaid 5...15% [8].

Õlgede varumine toimub lühikesel teravilja koristusperioodil, tavaliselt augustis. Et kasutada õlgesid põhikütusena kogu kütteperioodi vältel, on vajalikud suured hoidlad. Vilja koristamisel on õlgede niiskussisaldus tavaliselt 30...60%, põletamiseks sobiv näitaja on aga alla 20%. Kuna hoidlas langeb õlgede niiskus 2...6% võrra, siis põletamiseks sobivate õlgede saamiseks ei tohiks nende niiskusesisaldus koristamisel ületada 25%. Kõrgema niiskusesisaldusega õlgi tuleb enne hoidlasse paigutamist hoidlas kuivatada, mis ühtlasi hoiab ära niiskete õlgede võimaliku isekuumenemise ja mädanemise säilitamisel. Kuivatamiseks piisab tavaliselt külma õhu puhumisest läbi õlgede [4].

### **Granuleerimine ja briketeerimine**

Enne töötlemist on vajalik rullpalli või kantpalli kujul pressitud materjal peenestada. Peenestamine on vajalik materjali käitlemise lihtsustamiseks. Sidumismaterjal tuleb enne esmast peenestamist eemaldada. Enne briketeerimist või granuleerimist on vajalik tooraine jahvatamine. Vajadusel toimub pärast jahvatamist materjali kuivatamine.

Põhuveski puhub peenestatud materjali mööda torusid kuivatustorni, kus saab materjali vajadusel kuivatada, et selle niiskusesisaldus ei ületaks 20%. Liiga niiske materjali korral ei jää pressimisel põhuosakesed kokku ja liiga kuiva korral võib tooraine söestuda. Peale kuivatamist toimub materjali granuleerimine või briketeerimine. Graanulpress töötab silindrilise matriitspressi põhimõttel, kus materjal pressitakse läbi avadega silindri. Vähem kasutatakse ka tasapinnalisi matriitspresse. Pressimise käigus materjal kuumeneb, ligniin pehmeneb ning materjal surutakse rullikute surve matriitsi koonuselitest avadest välja [4]. Läbi koonuseliste avade pressitud mass on tugevalt kokku surutud ja seda lõigatakse matriitsi pinnal liikuvate teradega. Graanulite pressimise protsess koosneb mitmest etapist. Kõigepealt juhitakse toormaterjal seadmesse, kus lisatakse vajadusel sideaineid. Näiteks Taanis asuvas Kõge põhugraanuli tootmistehases lisatakse toorainele 0,25% kaltsiumseepi ja 1,5% auru [9]. Lõpuks pressitakse tooraine läbi matriitsi ning lõigatakse sobivasse pikkusesse. Sellele järgneb sorteerimine, kus väiksemad osakesed ja lagunenud graanulid suunatakse tagasi pressimisele. Peale pressimist suunatakse graanulid jahutisse ja sealt edasi hoidlasse.

Briketeerimiseks kasutatakse kolb- ja kruvipresse. Kolbpress töötab tsükliliselt – kolvi iga töökäiguga surutakse teatud kogus materjali läbi koonilise hülsi ja saadaval briketil on need kihid selgelt eristatavad. Pressi ajamis kasutatakse alati hooratast, mis võimaldab mootori koormust ühtlustada. Kolbpressi töötamisel kulub kolb minimaalselt, sest suhteline liikumine pressitava materjali ja kolvi vahel on väike. Kiiresti kulub aga hüls. Kolbpressid on suhteliselt odavad ja seetõttu laialt levinud. Võrreldes kolbpressiga on kruvipress kergem, sest puuduvad massiivsed kolvid ja hoorattad. Toodang väljub pidevalt ja seda saab lõigata sobivasse pikkusesse. Tihedus on kruvipressiga toodetud briketil suurem kui kolbpressiga toodetul. Kruvipressid teevad vähe müra, sest puuduvad löökkormused. Nende puudustena võib märkida suuremat energiakulu ja kruvi kiiret kulumist. Et vähendada energiakulu pressimisel, võib kasutada hülsi kuumutamist. Sel juhul saadakse söestunud välispinnaga brikett, mida on kergem süüdata. Söestunud välispind takistab ka niiskuse imendumist [4].

## Graanulitehase kavandamine

Toormaterjaliks sobiks suurkantpallideks pressitud põhk. Põhupalli laius oleks 1200 mm, kõrgus 1300 mm, pikkus 2800 mm ja ligikaudne tihedus 160 kg/m<sup>3</sup>. Tootmine põhineks materjalil, mille niiskussisaldus on alla 15%, mõnel üksikul põhupallil kuni 20%.

Graanulitehas töötaks 260 päeva aastas, 5 päeva nädalas, 14 tundi päevas. Tehase maksimaalvõimsuseks võiks olla  $Q = 4$  t/h. Tehas võiks töötada 75% koormusega ehk  $Q_2 = 3$  t/h. Plaanilisi hooldustöid tehakse üks kord kuus puhkepäeval. Aastane toodang arvutuks valemist

$$T = Q \cdot \nu \cdot H_p \cdot P_a \quad (1)$$

Siin:  $T$  – aastane graanulitoodang t/a ( $a$  – aasta);  
 $Q$  – tehase maksimaalvõimsus t/h ( $Q = 4$ );  
 $\nu$  – koormustegur ( $\nu = 0,75$ );  
 $H_p$  – töötundide arv päevas h ( $H_p = 14$ );  
 $P_a$  – tööpäevade arv aastas d [ $P_a = 260$  (d – päev)].

Arvestades eelpool toodud andmeid, saame:

$$T = 4 \cdot 0,75 \cdot 14 \cdot 260 = 10920 \text{ t/a}$$

Kuna tootmisliin on ehitatud selliselt, et jääkmaterjale ei tekiks, on vajamineva toormaterjali kogus ligikaudu 11.000 tonni. Olenevalt taimeliigist, saadakse 1 ha viljapõllult keskeltläbi 1,75 tonni põhku [10]. Aastase tooraine kasvamiseks vajaliku kasvuala pindala on arvutatud valemist

$$S = \frac{T}{M}, \quad (2)$$

kus  $S$  – viljapõldude pindala ha;  
 $T$  – vajamineva tooraine kogus t ( $T = 11000$ );  
 $M$  – 1 hektarilt keskmine saadav põhukogus t ( $M = 1,75$ ).

Viies arväärtused valemisse (2), saame:

$$S = \frac{11000}{1,75} = 6285,72 \text{ ha}$$

Järelikult on vajamineva tooraine kasvuala pindala ligikaudu 6300 ha. Ühe suurkantpalli ruumala on arvutatud valemiga

$$V_p = p \cdot l \cdot k, \quad (3)$$

kus  $V_p$  – põhupalli ruumala m<sup>3</sup>;  
 $p$  – põhupalli pikkus m ( $p = 2,8$ );  
 $l$  – põhupalli laius m ( $l = 1,2$ );  
 $k$  – põhupalli kõrgus m ( $k = 1,3$ ).

Valemi (3) abil saame, et põhupalli ruumalaks oleks 4,37 m<sup>3</sup>

Põhupalli mass on arvutatav valemist

$$M_p = V_p \cdot \rho, \quad (4)$$

kus  $M_p$  – põhupalli mass kg;  
 $V_p$  – põhupalli ruumala m<sup>3</sup> ( $V_p = 4,37$ );  
 $\rho$  – põhupalli tihedus kg/m<sup>3</sup> ( $\rho = 160$ ).

Valemit (4) kasutades saame põhupalli massiks 699,2 kg.

Ühe suurkantpalli ligikaudne mass on 700 kg. Aastas vajaminevate põhupallide kogus on arvutatud valemist

$$K_p = Q_2 / M_p \cdot H_p \cdot P_a \quad (5)$$

kus  $K_p$  – vajaminevate põhupallide hulk;

$Q_2$  – tehase tootlikus t/h;

$M_p$  – põhupalli mass t;

$H_p$  – töötundide arv päevas h;

$P_a$  – tööpäevade arv aastas d.

Eelpool toodud andmeid arvestades saame põhupallide hulgaks 15.600.

Lao mõõtmete leidmiseks arvutame vajamineva toormaterjali ruumala valemist

$$V_l = V_p \cdot K_p \cdot \tau \quad (6)$$

kus  $V_l$  – lao ruumala m<sup>3</sup>;

$V_p$  – põhupalli ruumala m<sup>3</sup>;

$K_p$  – vajaminevate põhupallide arv;

$\tau$  – mahtuvuskoefitsient ( $\tau = 0,9$ ).

Arvestades eelpool toodud andmeid, saame tulemuseks 61354,8 m<sup>3</sup>.

Laohoone ruumalaks peaks olema seega 61355 m<sup>3</sup>. Mahtuvuskoefitsiendiks on arvestatud 0,9, mis tuleneb toormaterjali mahutamistest ja teleskooplaaduri tööruumist. Laohoone kõrguseks on 11 m. Laohoone pindala on arvutatud valemist

$$S_l = \frac{V_l}{h}, \quad (7)$$

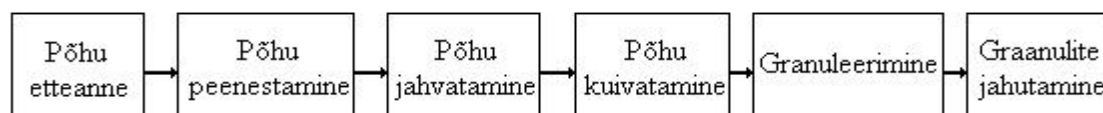
kus  $S_l$  – laohoone pindala m<sup>2</sup>;

$V_l$  – laohoone ruumala m<sup>3</sup>;

$h$  – laohoone kõrgus m ( $h = 11$ ).

Arvutuse tulemuseks on 5577,73 m<sup>2</sup>.

Laohoone pindala on 5580 m<sup>2</sup>, mõõtmed on 60 m x 93 m x 11 m. Põhugraanuli tootmisskeem on näidatud joonisel 1.



**Joonis 1.** Graanulitehase tootmisskeem

Tootmisliin töötab 14 tundi päevas. Etteandelauda varustab põhupallidega teleskooplaadur. Etteandelaual eemaldatakse käsitsi nõõrid. Kõik seadmed on juhitud juhtpaneelist, kas ükshaaval või automatiseerituna. Seadmed on varustatud anduritega, mis võimaldavad vajadusel teiste seadmete jõudluse muutmist.

Tööpäeva lõppedes lülitatakse kõigepealt välja etteandelaud, etteanne põhuveskile ja graanulpressi materjaliga varustav tigukonveier, mõne aja möödudes ka teised seadmed. Pärast tootmisliini väljalülitamist puhastatakse graanulipressi matriits.

### Tigukonveierite tehnoloogilised arvutused

Materjali juhtimiseks ja transpordiks seadmete vahel on graanulitehases kokku viis tigukonveierit. Vajaliku materjali liikumise tagamiseks on tigukonveierid erineva pikkuse ja läbimõõduga. Ühe tigukonveieri jõudlus põhuhekslite ja graanulite transportimisel on arvutatud valemist

$$Q_3 = 0,25\pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot s \cdot n_t \cdot \gamma \cdot k_v \cdot \psi \cdot k_k, \quad (8)$$

kus  $Q_3$  – konveieri jõudlus kg/h;

$D$  – teo välisläbimõõt m;

$d$  – teo võlli läbimõõt m;

$s$  – teo samm m;

$n_t$  – teo pöörlemissagedus s<sup>-1</sup>;

$\gamma$  – materjali tihedus kg/m<sup>3</sup>;

$k_v$  – materjali libisus ehk materjali joonkiiruse ja teo joonkiiruse suhe  $v_m/v_t$  ( $k_v = 0,6...0,9$ );

$\psi$  – teo täitetegur (põhuhekslile  $\psi = 0,25...0,30$ ; graanulile  $\psi = 0,25...0,35$ );

$k_k$  – teo kaldeteguri jõudluse valemis (tabel 3).

Jõudluse valemis oleva teo kaldeteguri sõltuvus teo kaldenurgast on välja toodud tabelis 3, tigukonveierite tootlikkused aga esitatud tabelis 4.

**Tabel 3.** Jõudluse valemis oleva teo kaldeteguri sõltuvus teo kaldenurgast [11]

$\alpha^\circ$	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90
$k_k$	1	0,9	0,8	0,71	0,65	0,58	0,52	0,48	0,44	0,39	0,34	0,3

**Tabel 4.** Tigukonveierite tootlikkus

Näitaja	Konveierid					
Materjal	Põhuheksel			Graanul		
Konveier	nr 1	nr 2	nr 3	nr 4	nr 5	nr 6
Välisläbimõõt D	0,5 m	0,45 m	0,45 m	0,2 m	0,2 m	0,3 m
Võlli läbimõõt d	0,2 m	0,2 m	0,2 m	0,08 m	0,08 m	0,13 m
Teo samm s	0,3 m	0,2 m	0,2 m	0,1 m	0,1 m	0,15 m
Pöörlemissagedus $n_t$	90 p/min	90 p/min	90 p/min	100 p/min	100 p/min	100 p/min
Materjali tihedus $\gamma$	50 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>	650 kg/m <sup>3</sup>	650 kg/m <sup>3</sup>	650 kg/m <sup>3</sup>
Materjali libisus $k_v$	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
Teo täitetegur $\psi$	0,28	0,28	0,28	0,3	0,3	0,3
Teo kaldenurk $k_k$	0,3	0,52	0,52	0,44	0,52	0,44
Konveieri jõudlus $Q_3$	4936 kg/h	4414 kg/h	4414 kg/h	6829 kg/h	6829 kg/h	22285 kg/h

Teo käitamiseks vajalik elektrimootori võimsus on arvutatud valemist:

$$P = g \cdot k_m \cdot Q_3 \cdot (f_c \cdot L + H) \cdot \eta_t^{-1}, \quad (9)$$

kus  $P$  – mootori võimsus kW;  
 $g$  – raskuskiirendus  $\text{m/s}^2$  ( $g = 9,81$ );  
 $k_m$  – teo kaldetegur mootori võimsuse valemis (tabel 4.3.);  
 $f_c$  – takistustegur teo ja seina vahel ( $f_c = 1,2$ );  
 $L$  – konveieri pikkus m;  
 $H$  – konveieri tõstekõrgus m;  
 $\eta_t$  – ülekandetegur mootori võllilt teole.

Tigukonveierit käitamiseks vajalike elektrimootorite võimsused on välja toodud tabelis 5 ning elektrimootorite võimsused tabelis 6.

**Tabel 5.** Võimsuse valemis oleva teo kaldeteguri sõltuvus teo kaldenurgast [11]

$\alpha^\circ$	20	25	30	35	40	60	90
$k_m$	1	1,05	1,13	1,2	1,32	1,86	2,5

**Tabel 6.** Elektrimootorite võimsused

Näitaja	Konveierid					
Konveier	nr 1	nr 2	nr 3	nr 4	nr 5	nr 6
Kaldetegur $k_m$	1,86	1	1,32	1,32	1,86	1,13
Konveieri pikkus $L$	6 m	1 m	2 m	2 m	8 m	2 m
Tõstekõrgus $H$	5 m	0,5 m	2 m	2 m	6 m	1 m
Ülekandetegur $\eta_t$	7	7	7	6	6	6
Elektrimootori võimsus $P$	2,14 kW	0,14 kW	0,49 kW	0,65 kW	3,24 kW	1,4 kW

### Kasutuskulu majandusarvutus

Tootmisliini maksumus on ligikaudu 6.250.000 krooni. Ühe aasta amortisatsiooninorm on 0,1. Tootmisliini aastane amortisatsioonikulu on arvutatud valemist:

$$A = H_t \cdot P_a, \quad (10)$$

kus  $A$  – tootmisliini amortisatsioon EEK;  
 $H_t$  – tootmisliini maksumus EEK;  
 $P_a$  – aasta amortisatsiooninorm.

Amortisatsioonikuluks arvutub seega 625.000 krooni. Tootmisliini tööaeg aastas on arvutatud valemist:

$$T_{töö} = H_p \cdot P_a, \quad (11)$$

kus  $T_{töö}$  – töötundide arv aastas h;  
 $H_p$  – töötundide arv päevas h;  
 $P_a$  – tööpäevade arv aastas d.



Tootmisliini ühe tööpäeva tarbitud energiahulk on arvatatud valemist:

$$E = P_t \cdot H_p, \quad (12)$$

kus  $E$  – tootmisliini poolt tarbitav energiahulk tööpäevas kWh;  
 $P_t$  – tootmisliini tarbimisvõimsus kW.

Tootmisliini seadmete tarbimisvõimsused, tööaeg ja tarbitav energiahulk on toodud tabelis 7.

**Tabel 7.** Tootmisliini seadmete tarbimisvõimsused, tööaeg ja tarbitav energiahulk

Seade	Tarbimis- võimsus kW	Tööaeg h		Energiahulk kWh	
		Päevas	Aastas	Päevas	Aastas
Etteandelaud	2,2	14	3640	30,8	8008
Põhupeenesti	300	14	3640	4200	1092000
Tigu nr 1	2,14	14	3640	29,96	7789,6
Silotorn	3	14	3640	42	10920
Filter	7,5	14	3640	105	27300
Tigu nr 2	0,14	14	3640	1,96	509,6
Põhuveski	44	14	3640	616	160160
Silotorn	3	14	3640	42	10920
Filter	7,5	14	3640	105	27300
Tigu nr 3	0,49	14	3640	6,86	1783,6
Graanulipress	150	14	3640	2100	546000
Tigu nr 4	0,65	14	3640	9,1	2366
Graanulijahuti	3	14	3640	42	10920
Tigu nr 5	3,24	14	3640	45,36	11793,6
Kokku:	526,86	14	3640	7376,04	1917770,4

## Kokkuvõte

Viiimasel ajal on Eestis puidupõhiste kütuste kõrval hakatud üha rohkem kasutama teisi tahke biokütuse liike nagu õled ja energiahein. Aktuaalseks on muutunud erinevate taastuvate biokütuste kasutamine alternatiivina fossiilsetele kütustele. Töös esitatakse üldine ülevaade põhust kui ühest perspektiivikamast biokütusest. Tutvustatakse põhugraanulite tooraine – põhu omadusi ja põhugraanulite tootmiseks kasutatavaid seadmeid. Lähemalt on vaadeldud kaht enam levinud biokütuse tootmise varianti ning toodud ülevaade granuleerimiseks ja briketeerimiseks vajalikest seadmetest.

Võimaliku graanulitehase kirjelduse põhjal leiti graanulitehasele järgmised arvutuslikud parameetrid:

- Graanulitehase aastane toodang on ligikaudu 11.000 t/a;
- Aastase tooraine kasvamiseks vajaliku kasvuala pindala on 6300 ha;

- Toorainelao ruumala on 61.355 m<sup>3</sup>;
- Toorainelao pindala on 5580 m<sup>2</sup>;
- Tootmisliini aastane amortisatsioonikulu on 625.000 EEK;
- Tootmisliini tarbimisvõimsus on 526,86 kW;
- Tootmisliini tarbitav aastane energiahulk on 191.770 kWh.

## Kirjandus

1. Kütuse- ja energiamajanduse pikaajaline riiklik arengukava aastani 2015. URL: <https://www.riigiteataja.ee/ert/act.jsp?id=829062> [24.05.2007].
2. Eesti energeetika arvudes 2005. URL: <http://www.mkm.ee> [23.04.2007].
3. Alkoholi-, tubaka- ja kütuseaktsiisi seadus. Riigi Teataja, I 2006, 29, 222. URL: <https://www.riigiteataja.ee/ert/act.jsp?id=1042886> [24.04.2007].
4. Vares, V.; Kask, Ü.; Muiste, P.; Pihu, T.; Soosaar, S. (2005) Biokütuse kasutaja käsiraamat. Tallinn, TTÜ kirjastus.
5. Põllumajandussektori 2006. aasta ülevaade. URL: <http://www.agri.ee/index.php/14282/> [15.04.2007].
6. Raigna, R. (2007) Tamsalu linn ja Säase saavad toasooja põhust. URL: [http://www.postimees.ee/161106/esileht/olulised\\_teemad/tarbija24/kasu/229014.php](http://www.postimees.ee/161106/esileht/olulised_teemad/tarbija24/kasu/229014.php) [20.04.2007].
7. Heinsoo, K.; Jürgens, K.; Kask, L.; Kask, Ü.; Koppel, A.; Soosaar, S.; Tilger, T.; Värnik, R. (2007) Projekt: *Biokütuste tootmise ja kasutamise riikliku programmi ettevalmistamine*. URL: <http://www.agri.ee/link.php?id=13579&filename=2005,09,16%20EPMÜ%20ja%20TTÜ%20uuring.pdf> [13.04.2007].
8. Large savings on heavier straw bales. Bioenergy research. 2004 August, nr 3. URL: <http://www.biopress.dk> [12.04.2007].
9. Pedersen, N. R. (2007) Production and use of biopellets. URL: <http://www.northernwoodheat.net/htm/news/Scotland/Elginbiomass/biomassprespdf/Productio nandUseofBioPellets.pdf> [07.05.2007].
10. Uibo, M. (2007) Valgamaalane: Ettevõtja püüab naftašeid põhu abil pika ninaga jätta. Roheline värav 21.04.2007. URL: <http://www.greengate.ee/index.php?page=1&id1=20687> [23.05.2007].
11. Liiske M. (1998) Tehnoloogiaseadmete elektriajamid. I osa. EPMÜ. Tartu.

# Metaantanki soojustehnilised parameetrid

Vaiko Vinnal

Eesti Maaülikooli tehnikainstituut

Artiklis analüüsitakse biogaasi tootmisel vajamineva metaantanki soojuskadusid läbi mahuti erinevate pindade. Kindlaks tehtud soojuskadude järgi saadakse teada, kui palju energiat kulub metaantanki enese soojendamiseks, et saavutada substraadi käärimiseks vajalik mahuti sisetemperatuur.

Biogaasiks ehk käärimisgaasiks nimetatakse orgaanilise aine peamiselt anaeroobsel käärimisel tekkivat, põhilise põlevosana metaani ( $\text{CH}_4$ ) sisaldavat gaasi [1]. Ühest kilogrammist läga orgaanilisest ainest võib saada 0,4...0,5 m<sup>3</sup> biogaasi, mille koostises on 60...70% metaani, 30...40% süsihappegaasi ning vähesel määral väävelvesinikku. Et biogaas sisaldab suures koguses metaani, võib seda edukalt kasutada loomakasvatushoonete soojendamiseks, valgustamiseks, käärinud sõnniku tahke fraktsiooni steriliseerimiseks ja kuivatamiseks, kütusena sisepõlemismootorites jne [2].

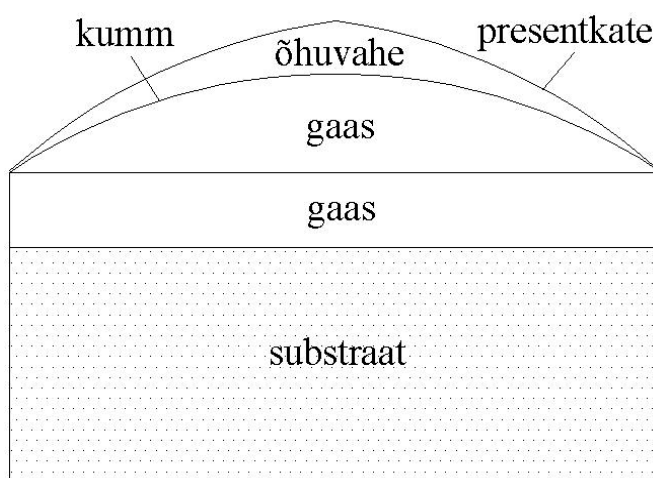
Biogaasi saadakse biomassist, mida võib jagada kaheks: põllul kasvav (hein, teraviljad, õlikultuurid) ja tootmistegevusega kaasnev biomass (sõnnik, orgaanilised jäätmed) [1].

Esimesi uuringuid loomade sõnnikust ja muudest orgaanilistest jäätmetest biogaasi saamiseks alustati juba XIX sajandi lõpul Inglismaal, Saksamaal ja Prantsusmaal. Väikeste seadeldistega saadud biogaasi abil köeti põhiliselt elumaju ja farme. Ka tarvitati biogaasi traktorite ja muude masinate kütuseks [2].

Meie vabariigis on hajutatud asustus, niiske kliima ja keerulised hüdrogeoloogilised olud: kõrge põhjavee tase, karstinähud. Sellepärast ei ole tänaseni suurte seafarmide sõnniku säilitamine, kasutamine ja looduskaitse seisukohalt kahjutuks tegemine rahuldavalt lahendatud [2].

## Uuritav objekt

Järgnevate parameetritega metaantanki pole realselt kasutatud, kuid arvutustes rakendatud meetodika abil võib kindlaks teha iga sarnase ehitusega, mistahes mõõtmetes mahuti soojustehnilised parameetrid (joonis 1). Teoreetilised lähteandmed on esitatud tabelis 1.



Joonis 1. Metaantanki vertikaalläbilõige.

**Tabel 1.** Lähteandmed

Nimetus	Andmed
Substraadi liik:	Läga
Mahuti maht:	370 m <sup>3</sup>
Mahuti silindrikujulise osa kõrgus:	4,7 m
Mahuti sfäärilise osa kõrgus:	1,5 m
Katusekihtide keskmine õhuvahe:	0,3 m

### Soojuslábikande arvutus

Silinderjas mahuti on kõrgusega 4,7 m, läbimõõdus 10 m. Mahuti 150-mm paksune betoonsein, on väljastpoolt kaetud 100-mm penoplastiga ja omakorda plekiga, mille paksus on 0,6 mm.

Välistemperatuuri ( $t_v$ ) ja sisetemperatuuri ( $t_s$ ) erinevusest tingitud soojusvoogu takistavad ka piirikihid sise- ja välispinnal. Välistemperatuuriks on võetud paljuaastane Eesti keskmine temperatuur kuude kaupa ning sisetemperatuuriks käärimisprotsessiks vajalik temperatuur vahemikus  $t_s = 30...40$  °C viie kraadi kaupa.

Algandmete järgi saab kõigepealt kindlaks teha mahuti erinevate osade pindalad: põhjapindala, substraadiga täidetud osa külgpindala, gaasita ja gaasiga täidetud osa pindala.

Mahuti põhjapindalana arvutatakse ringi pindala, milleks on 79 m<sup>2</sup>. Kuna substraadiga täidetakse ligikaudu 3/4 mahutist, siis substraadiga täidetud mahuti osa külgpindala on 3/4 mahuti külgpindalast ehk 111 m<sup>2</sup>.

Mahutis olev mõtteline ruum, kuhu gaas koguneb, on osaliselt kumera kujuga. Kumera pinna pindala arvutamisel võib arvestada, et tegemist on kera segmendiga. Segmendid on kera osad, mis saadakse kera lõikamisel tasandiga.

$$S_{gaas} = \frac{1}{4} \cdot S_k + S_{sfäär}$$

Mahuti gaasiga täidetud osa pindala arvutamiseks on vaja arvutada mahuti sfäärilise osa pindala. Selle arvutamiseks on veel vaja teada kera raadiust, millest me oleme segmendi võtnud.

$$R_{kera} = \frac{r^2 + h^2}{2 \cdot h}$$

Mahuti gaasiga täidetud osa pindalaks saame 123 m<sup>2</sup>, sellest 37 m<sup>2</sup> moodustab mahuti silindrikujuline osa ning 86 m<sup>2</sup> mahuti sfääriline ehk kummikatte pindala.

Kasutades sama metoodikat, leiame ka presentkatte pindala, milleks on 89 m<sup>2</sup>.

### Soojustakistused

Soojustakistused sõltuvad materjalide paksusest ja nende soojusjuhtivusteguritest. Meile on teada järgmiste materjalide soojusjuhtivustegurid:

$$\lambda_{plekk} = 0,034 \text{ W/(m}\cdot\text{K)};$$

$$\lambda_{peno} = 0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)};$$

$$\lambda_{betoon} = 0,8374 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}.$$

Näitena olgu toodud pleki soojustakistuse arvutuskäik:

$$R_{plekk} = \frac{a}{\lambda_{plekk}},$$

kus  $R_{plekk}$  – pleki soojustakistus, (m<sup>2</sup>·K)/W;  
 $a$  – pleki paksus, m ( $a = 0,0006$  m);  
 $\lambda_{plekk}$  – pleki soojusjuhtivustegur, W/(m·K) ( $\lambda_{plekk} = 0,034$  W/(m·K)).

$$R_{plekk} = \frac{0,0006}{0,034} = 0,018 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

Sama meetodiga saame arvutada ka teiste materjalide soojustakistused kui on teada keskkonna soojusülekandevegurid. Erinevused ilmnevad pindade soojustakistuste arvutamisel mahuti sise- ja välispinnal. Soojusülekandeveguri väärtus mahuti seina välispinnal  $\alpha_v = 12$  W/(m<sup>2</sup>·K), sisepinnal, gaasiga täidetud osas aga  $\alpha_{gaas} = 8$  W/(m<sup>2</sup>·K). Substraadiga täidetud mahuti osa soojusülekandevegur tuleb arvutada. Otsitava suuruse leidmiseks kasutame *Nusselti*, *Grashofi* ja *Prandtl*i arvude abi. *Nusselti arv* iseloomustab soojusülekande intensiivsust. *Grashofi arv* iseloomustab vabakonveksiooni hüdrodünaamikat. Vabakonveksiooni kutsutakse esile soojuskandja soojenemine või jahtumine soojusülekandepinnal. *Prandtl*i arv arvestab soojuskandja viskoossuse ja temperatuurijuhtivuse koosmõju [5].

*Grashofi arvu* leiame antud juhul substraadi käärimise temperatuuril 35 °C ning temperatuuride vaheks võtame 30 kraadi, sest arvutustest selgub, et soojusülekandeveguri väärtus ei sõltu antud temperatuurivahemiku korral (30...40 °C) käärimise temperatuurist ega temperatuuride vahest.

Soojusülekandevegur mahuti sisepinnal on 797,13 W/(m<sup>2</sup>·K). Nüüd saame arvutada ka soojustakistuse mahuti sisepinnal:

$$R_s = \frac{1}{797,13} = 0,001 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

Pärast arvutusi saame soojustakistuseks mahuti sisepinnal substraadiga täidetud osas 0,001 (m<sup>2</sup>·K)/W, mis sisuliselt ei mõjuta selles mahuti osas soojuslähikandevagurit. Viimase leiame, kui liidame kokku kõigi kihtide soojustakistused, saades tulemuseks 3,14 (m<sup>2</sup>·K)/W.

## Soojusvool

Soojusvoolu leiame mahuti pindade sise- ja välistemperatuuride vahelise amplituudväärtuse jagamisel soojustakistusega. Mahuti sise- ja välistemperatuur on valitud samamoodi nagu soojuslähikande arvutamisel (tabel 2).

**Tabel 2.** Kuude pikaajalised keskmised välistemperatuurid [3].

Periood Kuu	Mahutiväline temp. ( $t_n$ ) °C	Mahutiväline temp. ( $T_n$ ) K
Jaanuar	-5,0	268,15
Veebruar	-5,4	267,75
Märts	-2,1	271,05
Aprill	3,5	276,65
Mai	9,5	282,65
Juuni	14,5	287,65
Juuli	16,6	289,75
August	15,6	288,75
September	11,3	284,45
Oktoober	6,7	279,85
November	1,8	274,95
Detsember	-2,15	271,00

### Soojuskadu

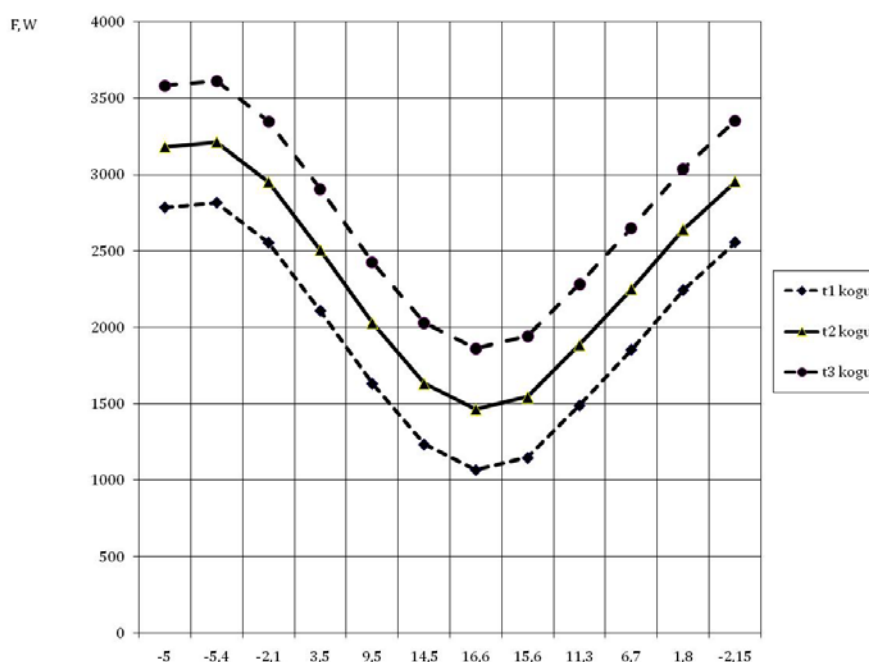
Soojuskao läbi mahuti sein ja lae erinevate temperatuuride korral leiame soojusvoolu ja vastava pinna pindala korrutamisel.

Soojuskadu läbi pinnasel asuva põranda määratakse tsoonide kaupa. Põrand jagatakse 2 m laiusteks tsoonideks piki välisseina. Välispiirdele kõige lähemal asuvat tsooni nimetatakse esimeseks, järgmisi teiseks, kolmandaks ja neljandaks tsooniks. Soojustakistused erinevatele tsoonidele on meil teada [4].

**Tabel 3.** Mahuti soojuskadu kuude kaupa, kui sisetemperatuur on 35 °C

Kuu	Keskmine temperatuur, $t$	Soojuskadu läbi sein substraadiga täidetud osas, $\Phi_{substraat}$	Soojuskadu läbi sein gaasiga täidetud osas, $\Phi_{gaas}$	Soojuskadu läbi põranda, $\Phi_{põrand}$	Soojuskadu läbi katuse, $\Phi_{katuse}$	Mahuti kogu soojuskadu, $\Phi_{kogu}$
	°C	W	W	W	W	W
Jaanuar	-5	1414,18	453,99	1020,96	292,02	3181,15
Veebruar	-5,4	1428,32	458,53	1031,17	294,94	3212,96
Märts	-2,1	1311,65	421,07	946,94	270,85	2950,51
Aprill	3,5	1113,66	357,52	804,01	229,97	2505,15
Mai	9,5	901,54	289,42	650,86	186,16	2027,98
Juuni	14,5	724,77	232,67	523,24	149,66	1630,34
Juuli	16,6	650,52	208,83	469,64	134,33	1463,33
August	15,6	685,88	220,18	495,17	141,63	1542,86
September	11,3	837,90	268,99	604,92	173,02	1884,83
Oktoober	6,7	1000,53	321,20	722,33	206,60	2250,66
November	1,8	1173,77	376,81	847,40	242,38	2640,35
Detsember	-2,15	1313,42	421,64	948,22	271,21	2954,49

**Tabelist 3** nähtub, et suurem osa soojusest läheb kaduma läbi substraadiga kaetud seina ning läbi põranda.



**Joonis 2.** Mahuti kogu soojuskao sõltuvus kuude pikaajalisest keskmisest välistemperatuurist:  $t_1$  – sisetemperatuur on 30 °C;  $t_2$  – sisetemperatuur on 35 °C;  $t_3$  – sisetemperatuur on 40 °C.

## Elektrienergia

Elektrienergia koguse leidmiseks on meil vaja teada ühest tonnist lägast saadava biogaasi minimaalset ja maksimaalset kogust (saagist). Biogaasi minimaalse saagise 1 t lägast leiame valemist:

$$B_{min} = \frac{k_{min}}{100} \cdot \frac{o_{min}}{100} \cdot s_{min} ,$$

kus  $B_{min}$  – minimaalne biogaasi saagis, m<sup>3</sup>;  
 $k_{min}$  – minimaalne kuivaine sisaldus vedelas seasõnnikus, % ( $k_{min} = 2,5\%$ ) [2];  
 $o_{min}$  – orgaanilise aine sisaldus kuivaines, % ( $o_{min} = 60\%$ ) [2];  
 $s_{min}$  – biogaasi saagis orgaanilise aine tonni kohta, m<sup>3</sup> ( $s_{min} = 260$  m<sup>3</sup>) [2].

$$B_{min} = \frac{2,5}{100} \cdot \frac{60}{100} \cdot 260 = 3,9 \text{ m}^3$$

Maksimaalne biogaasi saagis ühest tonnist lägast on analoogsel viisil leituna 37,1 m<sup>3</sup>. Seega biogaasi saagis ühest tonnist lägast on 3,9...37,1 m<sup>3</sup>.

Nagu näeme, võib orgaanilisest ainest toodetava biogaasi saagis kõikuda üsna suurtes piirides.

Kasvatavates taimedes sõltub see näiteks kasvukohast, väetistest, ilmastikust jne. Loomsete produktide (sõnniku) korral on sõltuvus ilmselt söödast, aga ka looma organismi iseärasusest jne.

Kõige lihtsam on kasutada biogaasi gaasipõletites, sest gaasi saab tuua mahutist põletisse madala surve all. Suurem osa põllumajanduses vajalikke soojusseadmeid on võimalik üle viia biogaasiküttele suurema moderniseerimiseta. Biogaasi võib edukalt kasutada ka gaasi-elektrigeneraatorites. Metaani alumine kütteväärtus on 9,94 kW·h/m<sup>3</sup> ning metaani sisaldus biogaasis on ligikaudu 60%. Meil on ka teada substraadi kogus, kui võtame arvesse, et substraadiga on täidetud  $\frac{3}{4}$  mahutist ( $278 \text{ m}^3 = 278$

tonni). Seega saame kindlaks teha toodetava elektrienergia koguse.

278 tonnist lägst saame antud algandmete korral 1084,2...10313,8 m<sup>3</sup> biogaasi. Kui arvestada, et elektrienergiat saab toota umbes 40% kogu saadavast primaarenergiast, toodetakse 278 tonnist lägst 2587...24605 kWh energiat.

## Kokkuvõtteks

Arvutustes kasutatud metaantank on teoreetiline ning realselt täpselt selliste mõõtmetega mahuti kasutuses pole. Arvutuste põhjal koostatud tabelis 3 on toodud ülevaade soojuskadudest läbi mahuti erinevate pindade. Selgelt nähtub, et suurem osa soojusest läheb kaduma läbi substraadiga kaetud seina ning läbi põrandat.

Töös arvutatud biogaasi kogus ning energiahulk on teoreetilised, illustreerides samas edukalt, kui suurtes piirides vastavad kogused võivad kõikuda. Näiteks kasvavate taimede puhul valitseb sõltuvus kasvukohast, väetistest ja ilmastikust. Loomsete produktide, näiteks sõnniku korral, on aga sõltuvus ilmselt söödast, samuti looma organismi iseärasusest. Optimaalse biogaasi koguse ning energiahulga kindlakstegemine vajab eraldi uurimist.

## Kirjandus

1. Olt, J.; Annuk, A.; Lepa, J.; Jõgi, E. (2006) Biogaasi tootmistehnoloogiad. Eesti Maaülikool. Tartu.
2. Annuk, A. Biogaasi tootmise tehnoloogia. Käsikiri. Kättesaadav: Eesti Maaülikooli Tehnikainstituut.
3. Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut: kliima, kuukokkuvõtted [Online]. URL: <http://www.emhi.ee/index.php?id=6,530> [19.05.2007].
4. Tenisberg, V. (1979) Küte ja ventilatsioon. Tallinn, Valgus.
5. Treier, V. (1989) Soojus- ja ainelevi alused. EPA rotaprint.
6. Mikk, I. (1977) Soojustehnika käsiraamat. Tallinn, Valgus.

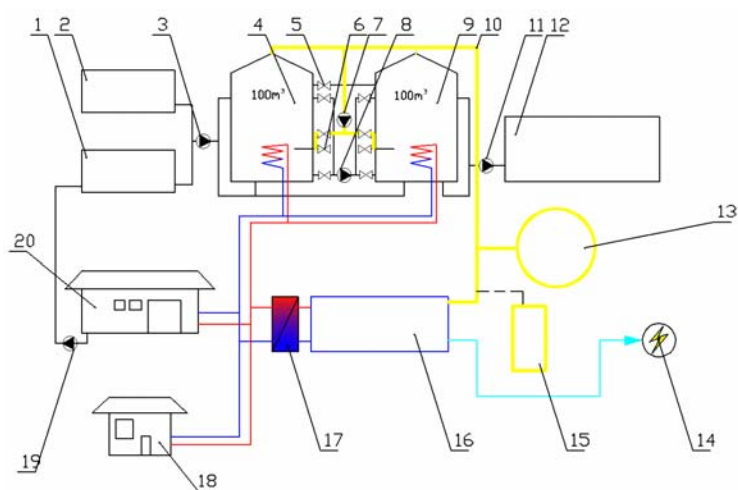


# Biogaasi pooltööstusliku katsereaktori pilootprojekt

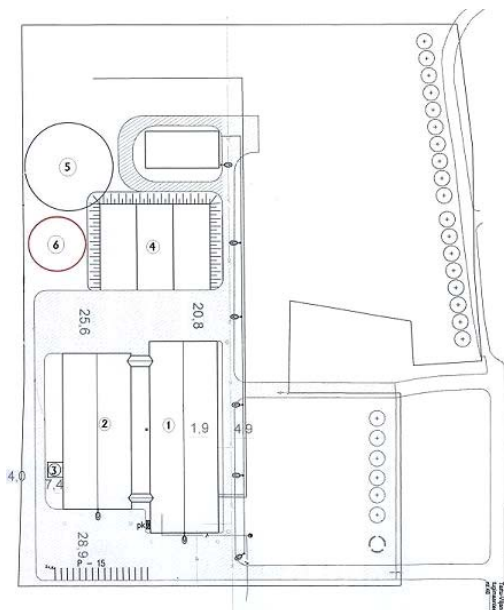
Veiko Proovel, Vano Kupatadze  
Eesti Maaülikooli tehnikainstituut

Eestis on hetkel biomassil põhineva koostootmisrežiimis toodetud elektri osakaal siseriiklikus elektritarbimises 0,2%, kuid aastaks 2013 on planeeritud osakaaluks 3%. Taastuvatest energiaallikatest toodetud kaugkütte soojuse osakaal kogu toodetud kaugkütte soojusest oli aastal 2005 21%, mis plaanitakse 2013. aastaks viia 33%-ni. Ühistranspordis biokütuste kasutamine puudub, kuid selle kasutuse osakaal tarbimises soovitakse viia kuni 6%-ni. Selle töö eesmärgiks oli Eesti tingimustesse sobiva biogaasi tootmistehnoloogia väljaselgitamine ja biogaasi katsereaktori projekteerimine Märja katselauda juurde Tartu maakonnas.

Projekteeritud biogaasijaama põhimõtteskeem on näidatud joonisel 1.



**Joonis 1.** Biogaasijaama põhisõlmed ja seadmed: 1 – sõnnikuhoidla, 2 – silohoidla, 3 – segur-purusti sisseviimispump, 4 – I reaktor, 5 – ülevooluventiil, 6 – substraadi proovivõtu kraan, 7 – gaasipump, 8 – ekstsentrump, 9 – II reaktor, 10 – gaasitorustik, 11 – ekstsentrump, 12 – jääkide hoidla, 13 – gaasimahuti, 14 – elektrivõrk, 15 – gaasianalüsaator, 16 – otto-gaas koostootmisjaam, 17 – soojusvaheti, 18 – kontorihoone, 19 – sõnnikupump, 20 – laut.



**Joonis 2.** Eesti Tõuloomakasvatavate Ühistu Märja katsefarmi asendiplaan: 1 – 1. laut, 2 – 2. laut, 3 – sõnnikupumpla, 4 – silohoidlad, 5 – vedelsõnnikuhoidla, 6 – biogaasireaktor.

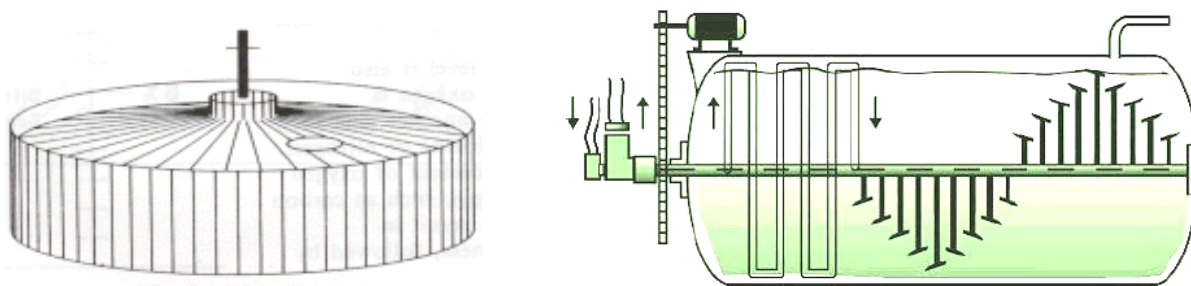
## Reaktori asukoht

Biogaasijaama asukohaks valiti Eesti Tõuloomakasvatajate Ühistu Märja Katsefarm Tartu maakonnas Tähtvere vallas Märja alevikus. Asendiplaani (joonis 2) projekteerijaks oli OÜ Agorek.

## Reaktori konstruktsiooni valik

Reaktorid võivad olla oma ehituselt vertikaalsed või horisontaalsed (joonis 3). Märja katselauda juurde projekteeritav reaktor peaks olema vertikaalne, kuna sellise valmistamise tehnoloogia oleks odavam. Materjalina kasutatakse süsinikterast, mis annab võimaluse keevislüüde abil lisada vajalikesse kohtadesse torustikke.

Kääritavat massi tuleb reaktoris perioodiliselt segada, sisestades värsket, baktereid sisaldavat käärivat massi. Samas ka massi töötemperatuuri ühtlustamiseks, settimise ennetamiseks ja töödeldavast massist gaasimullide eemaldamiseks bakterite metabolismi suurendamise eesmärgil. Massi segamiseks kasutatakse mehaanilisi, pneumaatilisi ja hüdraulilisi segisteid [5].



Joonis 3. Reaktorite tüübid: a – horisontaalne reaktor, b - vertikaalne reaktor.

## Biogaasi tekkeprotsess

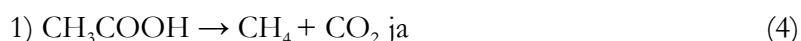
Biogaas tekib bioloogilise protsessi tulemusena. Hapniku ligipääsu puudumisel tekib orgaanilisest massist gaaside segu, nn biogaas. See looduses laialt levinud protsess toimub näiteks rabades, järvepõhjas, sõnnikuhoidlas ning mäletsejate vatsas. Seejuures muudetakse orgaaniline mass peaaegu täielikult biogaasiks ja tekib ainult väike kogus uut biomassi või soojust. Tekkinud gaasisegu koosneb ca 2/3 metaanist [ $\text{CH}_4$ ] ja ca 1/3 süsinikdioksiidist [ $\text{CO}_2$ ]. Nende kõrval leidub biogaasis veel väheste kogustes vesinikku, väävelvesinikku, ammoniaaki ja teisi mikrogaase. Et biogaasi tekkimisprotsessi selgitada, võib selle protsessi jagada mitmeks osaprotsessiks. Hüdrolyüsi esimese sammuna lagundatakse lähtematerjali tervikühendid (nt süsinikhüdraadid, valk, rasvad) lihtsamateks orgaanilisteks ühenditeks (nt aminohapeteks, suhkruks, rasvhapeteks). Selles protsessis osalevad bakterid vabastavad seejuures ensüüme, mis lagundavad materjali biokeemilisel teel. Tekkinud vaheproduktid lagundatakse nõndanimetatud hapendumisfaasis (atsiogenees) hapet tekitavate bakteritega edasi alamateks rasvhapeteks (propioon- ja võihappeks), samuti süsinikdioksiidiks ja vesinikuks. Seejuures moodustub ka väike kogus piimhapet ja alkoholi. Need ained muundatakse seejärel atsetogeneesi käigus ehk äädikhappe moodustamisel bakterite poolt biogaasi eelsubstantsideks [äädikhappeks ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), vesinikuks ( $\text{H}_2$ ) ja süsinikdioksiidiks ( $\text{CO}_2$ )]. Selles faasis osalevad kaks bakterite gruppi. Ühed neist moodustavad atsetaadi, näiteks tekib propioon- ja võihapest ning butaanhapest äädikhape [8]:



Teine atsetogeensete bakterite grupp sünteesib vesinikust ja  $\text{CO}_2$ -st äädikhapet:



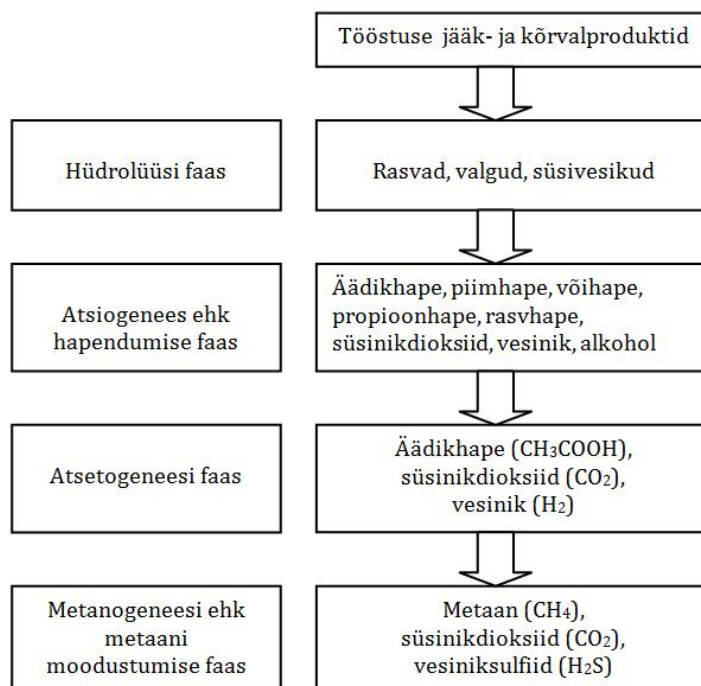
Kuna vesiniku liiga suur kogus on äädikhapet moodustavatele bakteritele kahjulik, peavad äädikhappetekiitajad moodustama koos metageneesibakteritega tiheda elukoosluse. Need tarvivad metaani moodustamisel vesinikku ja hoolitsevad sel moel atsetogeensetele bakteritele sobivate elutingimuste eest. Järgnevas metanogeneesis, biogaasi moodustumise viimases etapis, moodustatakse atsetogeneesi produktidest metaan. Metanogeenses staadiumis toodavad bakterid metaani kahel viisil:



Esimese valemi (4) kohaselt tekib 72%, teise (5) kohaselt 28% metaanist.

Kui need neli lagundamise etappi kulgevad fermenteerijas korraga, räägitakse üheastmelistest seadmetest. Kuna aga bakteritel on erinevates lagundamise etappides (joonis 4) oma elutegevuseks erinevad nõudmised, tuleb leida kompromiss. Kuna metaanibakterid on kõige tundlikumad häirivate tegurite suhtes ning paljunevad aeglaselt, sobitatakse keskkonnatingimused sellistes süsteemides tavaliselt nendele sobivate tingimustega. Seevastu kaheetapilistes seadmetes eraldatakse hüdroolüüs ja atsetogenees järgnevatest lagundamisetappidest ruumiliselt. Seeläbi on võimalik keskkonnatingimusi paremini sobitada erinevate bakterigruppidega ning saavutada kõrgemaid lagundamisvõimsusi.

Kääritusprotsessi võib jagada kolmeks [13]: 1) tsükliline; 2) pidev; 3) poolpidev protsess (joonis 4).



**Joonis 4.** Anaeroobse kääritamise faasid.

## Biogaasi tootmisprotsessi energeetiline efektiivsus

Mingi protsessi energeetilise efektiivsuse all mõeldakse üldjuhul saadava kasuliku energia ja protsessi sisestatava koguenergia suhet. Biogaasi tootmise energeetilist efektiivsust võib käsitleda mitmeti [1]:

- 1) protsessist saadava energia  $W$  ning protsessi siseneva toormaterjali  $W_a$  energia sisalduse suhet võiks nimetada näiteks **energeetiliseks kasuteguriks**

$$\eta_{el} = \frac{W}{W_a}, \quad (6)$$

kus  $W$  on protsessist saadav energia, kWh;  
 $W_a$  – protsessi siseneva toormaterjali energia, kWh.

- 2) protsessi omatarbeenergia  $W_o$  ja protsessist saadava  $W$  suhe oleks **omatarbetegur**

$$\eta_{e2} = \frac{W_o}{W}, \quad (7)$$

kus  $W_o$  on protsessi omatarbeenergia, kWh;  
 $W$  – protsessist saadav energia, kWh.

Kui protsessi omatarbeenergiale  $W_o$  liidetakse energia  $W_u$ , mis kulub tooraine transpordile ning jagatakse protsessist saadava energiaga, oleks tegu **laiendatud omatarbeteguriga**

$$\eta_{e3} = \frac{W_a + W_o}{W}, \quad (8)$$

kus  $W_a$  on protsessi siseneva toormaterjali energia, kWh;  
 $W_o$  – protsessi omatarbeenergia, kWh;  
 $W$  – protsessist saadav energia, kWh.

Siinjuures me mõistame protsessist saadava koguenergia  $W$  all saadava gaasi kasuliku energia (kütteväärtuse) ja protsessi omatarbeenergia summat. Omatarbeenergia sisaldab ka kadusid, näiteks soojuskaod läbi kääriti välispiirete. Samas ei pruugi kirjeldatud koguenergia olla lõplik. Täiendavalt võib saada energiat kuiva käärimisjäägi põletamisest, samuti kuivainesse jäänud väetiseelementide kasutamisest. Protsessist saadav biogaasi energia jaguneb üldjuhul kaheks: elektri- ja soojusenergia.

## Reaktori maht

Reaktori mahu arvutamisel eristatakse reaktori efektiivset, sealjuures kasutatavat suurust, ja kogusuurst. Efektiivne suurus on ruum, mis ka tegelikult substraadiga täidetakse. Siia lisandub veel gaasiruum, mis võib olla erineva suurusega, sõltuvalt iga jaama kujust. Ümarmahutitele on enamasti lisatud 50 cm kõrgust. Reaktori maht määratakse tegelikkuses kindlaks kahe parameetriga: 1) peatumisaeg; 2) käärimisruumi koormus.

Sõnniku tekkimise väärtused on võetud tabelist 1 [5]. Sõltuvalt loomaliigist ja nende pidamisviisist, on vedelsõnniku gaasisisaldus erinev ning vastavalt kogustele eraldi arvestatud. Lisaks on arvestatud substraadid, nagu näiteks rohu- või maisisilo ja teised orgaanilised materjalid, mida kääritamisel lisatakse. Päevane vedelsõnniku kogus:

$$S = z \cdot s_1, \quad (9)$$

kus  $z$  on loomade arv;  
 $s_1$  – päevane vedelsõnniku kogus loomaliikide kaupa, m<sup>3</sup>.

**Tabel 1.** Sõnniku tekkimise kogused loomaliikide kaupa.

Sõnniku teke 10 %-lise kuivaine sisaldusega ühe looma kohta			
	Päevas	Kuus	Aastas
Piimaveised	0,055	1,65	19,8
Nuumpullid	0,023	0,69	8,3
Noorveised	0,025	0,75	9,0
Mullikad	0,004	0,12	1,4
Nuumsead	0,0045	0,14	1,6
Põrsad	0,002	0,06	0,7
Munejad kanad	0,0002	0,0059	0,071

Aastane vedelsõnniku kogus:

$$s_a = s \cdot n, \quad (10)$$

kus  $s$  on päevane vedelsõnniku kogus;  
 $n$  – päevade arv aastas ( $n = 365$ ).

Päevane substraadikogus:

$$S = s + s_r, \quad (11)$$

kus  $s$  on päevane vedelsõnniku kogus, m<sup>3</sup>;  
 $s_r$  – päevane rohusilo kogus, m<sup>3</sup>.

Aastane substraadi kogus:

$$S_a = S \cdot n, \quad (12)$$

kus  $S$  on päevane substraadi kogus, m<sup>3</sup>;  
 $n$  – päevade arv aastas ( $n = 365$ ).

Kasutatav reaktorimaht

$$V_k = S \cdot t, \quad (13)$$

kus  $S$  on päevane substraadi kogus, m<sup>3</sup>;  
 $t$  – valitud reaktoris kääritusperiood, päeva.

Kogu reaktorimaht

$$V = V_k + V_g, \quad (14)$$

kus  $V_k$  on kasutatav reaktori maht, m<sup>3</sup>;  
 $V_g$  – gaasiruum reaktoris, m<sup>3</sup>.

Tabelis 2 on toodud arvandmed 100-pealise piimaveisekarja ja 17 ha rohusilo pinnaga põllumajandusettevõtte kohta.

Kui päevas tekib ligi  $S = 6,5$  m<sup>3</sup> substraati ja see vajab  $t = 28$  päeva seisuaega, siis on reaktorimahtu vaja ligi  $V = 200$  m<sup>3</sup>, millele vastab kaks järjestikust hoidlat läbimõõduga  $D = 5,5$  m ja kõrgusega  $H = 4,5$  m. Kaks järjestikust reaktorit on valitud biogaasi tekkeprotsessist lähtuvalt, kus esimeses oleva substraadi pH on 4,5...6,3 ja teises on pH 6,8...7,5.

**Tabel 2.** 100-pealine piimaveisekarja ja 17 ha rohusilo pinnaga põllumajandusettevõtte tehnilised parameetrid biogaasi tootmiseks

Näitaja	Valem	Arvväärtus, m <sup>3</sup>
Päevane vedelsõnniku kogus	$s = z \cdot s_1$	5,5
Aastane vedelsõnniku kogus	$s_a = s \cdot n$	2007,5
Päevane substraadikogus	$S = s + s_r$	6,5
Aastane substraadikogus	$S_a = S \cdot n$	2372,5
Kasutatav reaktorimaht	$V_k = S \cdot t$	182
Kogu reaktorimaht	$V = V_k + V_g$	194

### Kääritusruumi koormuse mõju mahu arvestusele

Reaktorimahu arvutus, silmas pidades käärimisruumi täitumust, toimub järgnevalt: kõigepealt määratakse kindlaks kääritatava materjali kuivaine ja orgaanilise kuivaine sisaldus. Järgnevates arvutustes võrdsustatakse ümardatult liiter- ja kilogrammnäidud.

Kuivaine on koostisosa, mis jääb järele pärast aines sisalduva vee eraldamist. Kuivainesisalduse määramiseks kuivatatakse aine mingil kindlal temperatuuril niiskuse täieliku eraldumiseni. Sõnniku kuivainesisaldus on  $TS_m = 7...17$  % vastavalt loomaliigist ja allapanust ning sõnniku koristamisviisist. Orgaanilise kuivaine sisaldus sõnnikus on  $oTS_m = 50...86$  % ning rohtsel massil kuni 98% kuivainest [5].

Kui tekkinud orgaaniline kuivmass on kindlaks määratud, saab lubatud kääritusruumi täitumise reguleeritud väärtuste abil kindlaks määrata ja seega leida hoidla mahutatavuse. Kääritusruumi täituvus peaks püsima tasemel 3...4 kg oTS (orgaanilist kuivainet)/m<sup>3</sup> reaktorimahust päevas. Mida raskemini substraat bioloogilises protsessis laguneb, seda madalama peab valima kääritusruumi täituvuse. Ülalpool alustatud vedelsõnniku- ja rohusilo segu näites ulatus see 3 kg oTS/m<sup>3</sup> päevas.

## Reaktori täituvuse arvestus etteantud mahu juures

Ümberpööratult on hõlbust etteantud reaktori mahu korral reaktori täituvust kontrollida:

$$V_t = \frac{oTS_k}{V_k}, \quad (15)$$

kus  $oTS_k$  on orgaanilise kuivaine sisaldus reaktoris olevas substraadisegus;  
 $V_k$  – kasutatav reaktorimaht, m<sup>3</sup>.

Kui  $oTS=668,8$  ja  $V_k=182$ , siis  $V_t=3,67$  m<sup>3</sup> oTS päevas.

Reaktori täituvus saadakse, kui orgaanilise päritoluga kuivmass jagada gaasiruumita reaktorimahuga ning on  $V_t = 3,67$  kg oTS m<sup>3</sup> päevas. Kääritusruumi täituvust võib kergesti tõsta või langetada näiteks lisatava rohusilo koguse muutmisega. Bioloogilises protsessis ei tohiks sellise koormuse ja substraadisegu juures mingeid häireid olla.

Järgnevalt arvutame substraadisegu kuivainesisalduse, kui päevas lisandub reaktoris 5,5 m<sup>3</sup> 8%-lise kuivainesisaldusega vedelsõnnikut ja 1 t 33%-lise kuivainesisaldusega rohusilo.

Kuivaine sisaldus vedelsõnnikus

$$TS_v = \frac{TS_{vv}}{100}, \quad (16)$$

kus  $s$  on päevane vedelsõnniku kogus, m<sup>3</sup>;  
 $TS_{vv}$  – kuivainesisaldus vedelsõnnikus, %.

Kui  $TS_{vv} = 5,5 \cdot 8$ , siis  $TS_v = 0,44$  m<sup>3</sup>.

Kuivainesisaldus rohusilos

$$TS_r = \frac{s_r \cdot TS_{rr}}{100}, \quad (17)$$

kus  $s_r$  on päevane rohusilo kogus, m<sup>3</sup>;  
 $TS_{rr}$  – kuivainesisaldus rohusilos, %.

Kui  $s_r = 1$  ja  $TS_{rr} = 33$ , siis  $TS_r = 0,33$  m<sup>3</sup>.

Kuivainesisaldus kokku

$$TS = TS_v + TS_r, \quad (18)$$

kus  $TS_v$  on vedelsõnniku kuivaine kogus, m<sup>3</sup>;  
 $TS_r$  – rohusilo kuivaine kogus, m<sup>3</sup>.

Kui  $TS_v = 0,44$  ja  $TS_r = 0,33$ , siis  $TS = 0,77$  m<sup>3</sup>.

6,5 m<sup>3</sup> substraadis on 770 kg tahket kuiva substantsi. 1 m<sup>3</sup> on vastavalt 118,5 kg kuivainet. Segus, mis koosneb 5,5 m<sup>3</sup> vedelsõnnikust ja 1 t rohusilost, on kuivainesisaldus  $TS = 11,8$  %.

## Gaasitoodangu kindlaksmääramine

Kindlaks määratud substraadikoguse ja selles sisalduva kuivaine järgi saab välja arvutada oodatava biogaasi või metaani hulga, kui on teada gaasitekke kogus orgaanilisest kuivainest. Orgaanilise kuivaine koguse korrutamine oodatava spetsiaalse gaasikogusega annab päevase gaasitekke:

$$G_{sum} = oTS_k \cdot G_t, \quad (19)$$

kus  $oTS_k$  on päevase orgaanilise kuivaine kogus,  $m^3$ ;  
 $G_t$  – gaasi teke vastavalt kuivainest,  $m^3/t$ .

Vedelsõnniku 1 tonnist orgaanilisest kuivainest saab ca  $G_{pv} = 294 \text{ m}^3$  ning 1 tonnist rohusilo kuivainest ca  $G_{pr} = 550 \text{ m}^3$  biogaasi.

Päevase biogaasi tekke vedelsõnnikust võib arvutada valemist:

$$G_{pv} = TS_v \cdot G_t, \quad (20)$$

kus  $TS_v$  on vedelsõnniku kuivaine kogus,  $m^3$ ;  
 $G_t$  – spetsiaalne gaasi teke vastavalt kuivainest,  $m^3/t$ .  
Kui  $TS_v = 0,44$  ja  $G_t = 294$ , siis  $G_{pv} = 129 \text{ m}^3$ .

Päevane biogaasi teke rohusilost:

$$G_{pr} = TS_r \cdot G_t, \quad (21)$$

kus  $TS_r$  on rohusilo kuivaine kogus,  $m^3$ ;  
 $G_t$  – spetsiaalne gaasi teke vastavalt kuivainest,  $m^3/t$ .  
Kui  $TS_r = 0,33$  ja  $G_t = 550$ , siis  $G_{pr} = 182 \text{ m}^3$ .

Päevane biogaasi teke:

$$G_{sum} = G_{pv} + G_{pr}, \quad (22)$$

kus  $G_{pv}$  on päevane biogaasi teke vedelsõnnikust,  $m^3$ ;  
 $G_{pr}$  – päevane biogaasi teke rohusilost,  $m^3$ .  
Asendades valemis (22)  $G_{pv} = 129$  ja  $G_{pr} = 182$ , saame  $G_{sum} = 311 \text{ m}^3$ .

Kokkuvõttes annab selline päevane biogaasi teke  $G_{sum} = 311 \text{ m}^3$  ja metaanitoodanguks 55%-lise metaanisalduse juures  $171,05 \text{ m}^3$  metaani.

Biogaasist saadav energiahulk päevas

$$E = G_{sum} \cdot G_{CH4} \cdot E_r, \quad (23)$$

kus  $G_{sum}$  on biogaasi päevane teke,  $m^3$ ;  
 $G_{CH4}$  – metaani sisaldus biogaasis, %;  
 $E_r$  – metaani alumine kütteväärtus,  $kWh/m^3$ .  
Asendades valemis (23)  $G_{sum} = 311$ ,  $G_{CH4} = 0,55$  ja  $E_r = 9,94$ , siis  $E = 1700 \text{ kWh}$  päevas.



## Protsessi energiavajaduse kindlaksmääramine ja arvutus

Biogaasi soojusenergiatarve koosneb värskelt juurdelisatud substraadi soojendamiseks kuluvast soojavajadusest ning reaktori soojatarbusest, mis on väga tugevalt sõltuv soojuse isoleerimise kvaliteedist. Projekteeritava reaktori töötemperatuuriks on  $T = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ , juurdelisatav mass ei tohi jahutada substraadisegu alla  $T = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mis põhjustaks protsessi aeglustumise ja gaasi tekkimise vähenemise. Teeme kontrollarvutuse vastavalt esimese reaktori mahu ja lisatava substraadikogusega.

Segu temperatuuri arvutus:

$$T_{v1v2} = \frac{V_1 \cdot T + V_2 \cdot T_2}{V_1 + V_2}, \quad (24)$$

kus  $V_1$  on reaktoris oleva segu maht,  $\text{m}^3$ ;  
 $T$  – reaktoris oleva segu temperatuur,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $V_2$  – lisatava segu maht,  $\text{m}^3$ ;  
 $T_2$  – lisatava segu temperatuur,  $^{\circ}\text{C}$ .

Toome näite talvistest tingimustest, kus lisatava massi temperatuuriks on võetud  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja mahuks  $6,5\text{ m}^3$ .

Kui  $V_1 = 84,5$ ,  $T = 38$ ,  $V_2 = 6,5$  ja  $T_2 = 1$ , siis  $T_{v1v2} = 35,36\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Kuna lisatava massi kogus on kogumassis ca 7%, ei ole vajadust massi eelsoojendamiseks. Lisades päevasele vedelsõnniku kogusele ( $5,5\text{ m}^3$ ) ühe tonni rohusilo, tõuseb kuivainesisaldus võrreldes algseguga 11,8%-ni.

Soojuskadude puhul tuleb kahte järjestikust reaktorit vaadelda eraldi. Kuna järjestikused reaktorid on identsed, saab arvutused läbi viia reaktorite mahtude summaga, kuid energiatarbe koefitsient tuleb valida siiski ühe reaktori mahu järgi. Kuivaine sisaldus on siiski mõlemas reaktoris sama ning see valitakse vastavalt kuivaine sisalduse protsendile [5].

Soojuskao ühtlustamiseks vajaliku energia saab arvutada valemist:

$$Q_1 = E_t \cdot V_{k1}, \quad (25)$$

kus  $E_t$  on energiatarve,  $\text{W}/\text{m}^3$ ;  
 $V_{k1}$  – esimese reaktori maht,  $\text{m}^3$ .  
 $Q_1 = 0,439 \cdot 200 = 88\text{ kWh/päev}$

Substraadi soojendamiseks vajalik energia esimesel reaktoril:

$$Q_2 = TS \cdot E_v, \quad (26)$$

kus  $TS$  on kuivaine sisaldus,  $\text{kg}$ ;  
 $E_v$  – energiavajadus,  $\text{Wh/kg TS}$ .  
Kui  $TS = 770$  ja  $E_v = 0,37$ , siis  $Q_2 = 285\text{ kWh päevas}$ .

Kogu protsessi soojavajadus:

$$Q_p = Q_1 + Q_2, \quad (27)$$

kus  $Q_1$  on soojuskao ühtlustamiseks vajalik energia, kWh/päev;  
 $Q_2$  – substraadi soojendamiseks vajalik energia, kWh/päev.

Asendades valemis (27)  $Q_1 = 88$  ja  $Q_2 = 285$ , saame soojavajaduseks  $Q_p = 373$  kWh päevas.

Arvestuslik päevane energiahulk, mis saadakse 100-pealiselt piimakarjalt ja 17 ha rohusilost, ulatub ca  $E = 1853$  kWh päevas. Kui koostootmisseadme termiline efektiivsus on 50%, siis kasutatavat soojust on ca  $q = 926$  kWh päevas. Reaktorite soojendamiseks on vaja  $q_1 = 373$  kWh päevas, kuid reaktoritest saadavast gaasihulgast on võimalik toota  $q = 926$  kWh päevas, seega 40% soojusenergiast kulub reaktorite soojendamiseks, ülejäänud soojust saab kasutada kontorihoone ja lauda soojavajaduste rahuldamiseks.

Iga kääritusruumi 1 m<sup>3</sup> vajab protsessi käigus soojendamiseks ca  $q_1 = 200...500$  kWh/a (keskmiselt 350 kWh/a) [5].

### Koostootmisseadme võimsuse kindlaksmääramine ja arvutus

Tänapäeval kasutatakse biogaasi koostootmisjaamades peaaegu eranditult elektrienergia tootmiseks. Sobiva koostootmisseadme valikul tuleks lähtuda gaasitootmise jõudlusest.

Koostootmisseadme võimsusest peab piisama, et realiseerida 24-tunnine gaasitoodang, mis on saadud 100-pealise loomakarjalt ja 17 ha kogutud rohusilost.

Ülaltoodud näitlikus ettevõttes on vastavalt vedelsõnniku toodangule ja rohusilo saagile võimalik paigaldada 30...50 kW võimsusega koostootmisseade. Täpsemaks võimsuse arvutamiseks peab teadma päevas toodetud metaani hulka. Et mitte alati kasutada koostootmisseadet täiskoormusel, on soovitatav võtta arvatud võimsuse varuteguriks  $Y = 20\%$  [5]. Arvutusteks on vajalikud järgmised näitväärtused:

- 3) Metaani kütteväärtus  $E_r = 10$  kWh/m<sup>3</sup>;
- 4) Kütteõli kütteväärtus  $E_k = 10$  kWh/l;
- 5) Mootori kütteõlivajadus  $B_e = \text{ca } 4,4 \text{ l}/100 \text{ m}^3$ ;
- 6) Elektriline efektiivsus sisepõlemismootoriga seadmel  $F = 28...42\%$ .

Päevane energiatoodang

$$E_{en} = G_{CH4sum} \cdot E_r + G_k \cdot E_k, \quad (28)$$

kus  $G_{CH4sum}$  on päevane metaani toodang, m<sup>3</sup>;  
 $E_r$  – metaani alumine kütteväärtus, kWh/m<sup>3</sup>;  
 $G_k$  – päevane kütteõlivajadus, l;  
 $E_k$  – kütteõli kütteväärtus, kWh/l.

Asendades valemis (28)  $G_{CH4sum} = 171,05$ ,  $E_r = 9,94$ ,  $G_k = 13,9$  ja  $E_k = 10$ , saame päevase energiatoodangu tulemusena  $E_{en} = 1839$  kWh.

Elektriline efektiivsus koostootmisel on  $F = 35\%$ .

Päevase elektrenergia toodangu leiame valemist

$$E_{el} = E_{en} \cdot F, \quad (29)$$

kus  $E_{en}$  on päevane energiatoodang, kWh;  
 $F$  – elektriline efektiivsus, %.  
 Kui  $E_{en} = 1839$  ja  $F = 0,35$ , siis  $E_{el} = 643,7$  kWh.

Koostootmiselise elektriline võimsus

$$W_{sij} = \frac{E_{el}}{24}, \quad (30)$$

kus  $E_{en}$  on päevane energiatoodang.  
 Kui  $E_{el} = 643,7$ , siis  $W_{sij} = 26,8$  kW.

Koostootmiselise võimsus koos varuteguriga

$$W_{sijv} = W_{sij} + Y, \quad (31)$$

kus  $W_{sij}$  on koostootmiselise elektriline võimsus, kWh;  
 $Y$  – koostootmiselise võimsuse varutegur, %.  
 Kui  $W_{sij} = 26,8$  ja  $Y = 20$ , siis  $W_{sijv} = 32,2$  kW.

## Reaktori konstruktsioon

Jaamatüübiks valiti püstine reaktor ja arvutatud selle maht, millele järgnes ehitustehniline planeerimine. Planeerimisse peab kaasama nii kohaliku kui ka maakondliku valitsustasandi, eelkõige maapealsete ehituste korral, ning vastavalt olukorrale, hankima ehitusloa. Reaktor projekteeriti SolidWorks keskkonnas 3D mudelina.

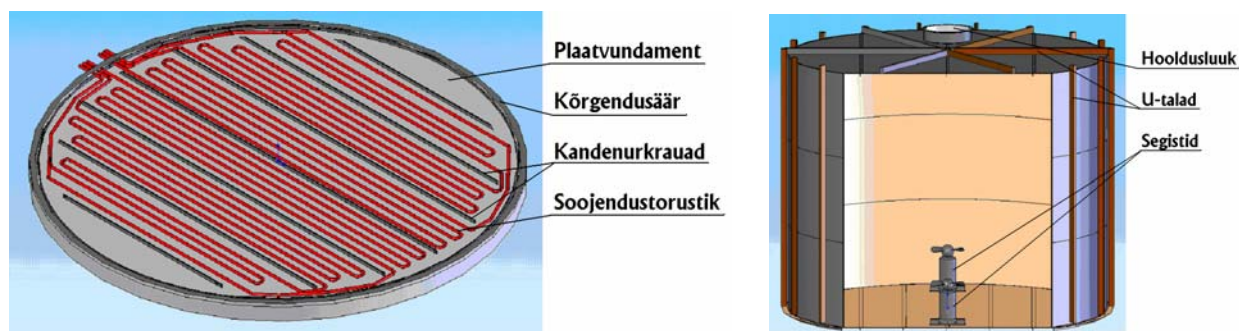
Reaktori projekteerimise lähteandmed on esitatud tabelis 3. Kui päevas on substraati ligikadu  $S = 6,5 \text{ m}^3$  ja see vajab  $t = 28$  päeva seisaega, on reaktorimahtu vaja  $V = 200 \text{ m}^3$ . Mahu jagada kahe järjestikuse reaktori vahel läbimõõduga  $D = 5,5 \text{ m}$  ja kõrgusega  $H = 4,5 \text{ m}$ , kus esimeses oleva substraadi pH = 4,5...6,3 ja teises pH = 6,8...7,5.

**Tabel 3.** Reaktori projekteerimise lähteandmed

Näitaja, tähis	Arvväärtus, ühik
Päevane vedelsõnniku teke, $s$	5,5 m <sup>3</sup>
Päevane substraadikogus, $S$	6,5 m <sup>3</sup>
Kasutatav reaktorimaht, $V_k$	182 m <sup>3</sup>
Kogu reaktorimaht, $V$	194 m <sup>3</sup>
Reaktori tööosa läbimõõt, $D$	5,5 m
Reaktori tööosa kõrgus, $H$	4,5 m

Reaktor on paigaldatud plaatvundamendile. Vundamendi kõrgendusäär on õlivanni tekitamiseks, mille sisse on paigutatud soojendustorustik (joonis 5). Torustike vahel toetub vundamendile reaktori S355J2G3 terasest kandnurkraud, mõõtudega 50 mm · 50 mm · 5 mm ja paari sentimeetri kaugusel vundamendi kõrgendusäärest sissepoole S355J2G3 terasest toetusvõru, mõõtudega

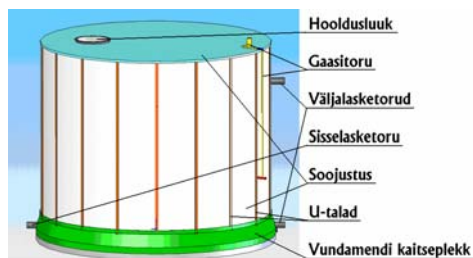
10 mm · 50 mm. Reaktoris oleva massi soojendamiseks on kandnurkraudade vahele paigaldatud vasest soojendustorustik, mis asub õlivannis. Õli aitab reaktori aluspinda ühtlaselt soojendada ja soojuskadusid vähendada. Niinimetatud põrandaküte soodustab reaktoris oleva biomassi ühtlast soojenemist, tekitades keemise efekti. Selline konstruktiivne lahendus ei ole õiguslikult registreeritud.



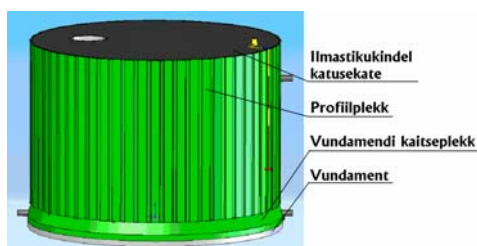
**Joonis 5.** Vundament ja soojendustorustik nurkraudade vahel.

Massi panevad liikuma kaks mootoriga varustatud segistit firmalt I.T.T. Flygt [6], mis aitavad kaasa temperatuuri ühtlustamisele reaktoris. Reaktori vastupidavuse kindlustamiseks on selle ümber keevitatud 18 püstist U-tala, millest kuus on omavahel ühendatud (joonis 5). Püsttalad on reaktorile kinni keevitatud neljast kohast, samuti ka alusplaadi külge, mis tagab konstruktsiooni jäikuse. Ülemised talad on ühendatud keermesliitega ja keevitatud kinni ülemisele plaadile. Alumise plaadi ja ülemise plaadi küljed on keevitatud kinni kahelt poolt, nende liitekohad aga läbivalt.

Joonisel 6 on kujutatud püstiste U-talade vahele paigaldatud 150-mm paksune soojustusmaterjal, mis on ehitusvahuga tihendatud. Reaktori pealispinda soojustatakse U-talade vahel 100-mm niiskuskindla tugeva soojustusmaterjaliga, millele lisatakse peale 50-mm kiht sama materjali, mis aitab vältida külmasilla tekkimist läbi U-tala. Reaktoris on üks sisselaske- ja kaks väljalasketoru, üks proovide võtmise toru, gaasi väljutamise toru ja hooldusluuk. Väljalasketorudest üks paikneb aluspinnast 3650 mm kõrgusel, mis tagab vajaliku koguse biomassi ülevoolu teatud taseme languseni, et reaktoris saaks uut toorainet sisestada. Alumisest väljalasketorust pumbatakse järgmisesse reaktoris settinud biomassi. Biomassi proovide võtmiseks ühendatakse proovivõtutoru reaktorist tuleva gaasitoruga, selleks et puhastada torustik seisma jäänud biomassist. Reaktori külgpind on kaetud profiilplekiga (joonis 7), mis tagab kindla kaitse ilmastikutingimuste eest. Vundamendi kaitseplekk kaitseb vee sattumist õlivanni ning vundamendi soojustust. Reaktori pealispinnal asetsev kõva soojustusmaterjal on kaetud omakorda ilmastikukindla katusekattega.



**Joonis 6.** Reaktor koos armatuuriga: soojustuse, U-taladega, sisse- ja väljalaske torudega, proovivõtu toru koos gaasitoru ühendusega, hooldusluugi ning vundamendi kaitseplekiga.



**Joonis 7.** Biogaasi reaktori pealiskate.

## Kokkuvõte ja järeldused

Biomassist energia tootmine on biokeemiline protsess, mille toimumiseks peab olema sobiv keskkond. Sobiv temperatuur ja pH tase tagatakse reaktori juhtimisega. Kui keskkond ei vasta normidele, siis protsess peatub, kuna protsessi läbiviivad bakterirühmad hävivad. Protsess vajab seega pidevat jälgimist, proovide võtmist selleks projekteeritud torustike kaudu ning nende analüüsimist.

Olulisemad järeldused biogaasi pooltööstusliku katsereaktori projekteerimisest:

- Biogaasi tekkimisprotsessi võib jagada osaprotsessideks: hüdroolüüs, atsiogenees, atsetogenees ja metanogenees (joonis 4). Kuna hüdroolüüsi ja atsiogeneesi faasis happeid moodustavad bakterid toimivad kõige efektiivsemalt pH vahemikus 4,5...6,3 ning atsetogeneesis ja metanogeneesis äädikhapet ning metaani tootvad bakterid vajavad pH 6,8...7,5 keskkonda, on vaja kasutada kahte järjestikust reaktorit töötemperatuuriga  $T = 39\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Reaktori suuruse valimisel tuleb arvestada läga  $s = 5,5\text{ m}^3$  ja toormassi  $s_r = 1\text{ m}^3$  päevast kogust;
- Projekteeritud reaktorid võivad olla identsed, mahuga  $V = 100\text{ m}^3$ ;
- $6,5\text{ m}^3$  substraadis on 770 kg tahket kuiva substantsi.  $1\text{ m}^3$  on vastavalt 118,5 kg kuivainet. Segus, mis koosneb  $5,5\text{ m}^3$  vedelsõnnikust ja 1 t rohusilost, on kuivainesisaldus 11,8 %;
- Päevaseks biogaasitoodanguks on  $G_{sum} = 311\text{ m}^3$  ja metaanitoodanguks 55%-lise metaanisisalduse juures  $171,05\text{ m}^3$  metaani;
- Biogaasist saadav energiahulk päevas on  $E = 1700\text{ kWh}$ ;
- Päevane elektrienergia toodang on  $E_{el} = 643,7\text{ kWh}$ ;
- Koostootmiseadme minimaalne võimsus on  $W_{sju} = 32,2\text{ kW}$ ;
- Standardsed osad komplekteeritakse ja valitakse kataloogidest.
- Täpsema majandusliku hinnangu andmine biogaasi tootmise perspektiividele rohest Eestis vajab põhjalikke arvutusi. Arvestades, et Eestis on praegu vähemalt 250.000 ha põllumajanduslikult kasutamata maad, on maaressurssi biogaasikultuuride kasvatamiseks piisavalt. Tõenäoliselt on aga lähitulevikus võimalik saada infrastruktuuri toetust taastuvenergia laiemaks kasutuselevõtuks.
- Biogaas on puhas, võib olla puhtaim bioloogiline kütteaine. Seda on tõendatud mitmes olelutsükli võrdluses.

## Kirjandus

1. Annuk, A. (2006) Biogaasi tootmisprotsessi energeetiline efektiivsus. EMÜ Tehnikainstituut. Tartu.
2. ARCHEA. (2006) Gas Treatment, Gas Analysis and Gas Technology. URL: <http://www.archea.de/index.php?language=2> [02.10.06].
3. Berning, A.; Brüggemann, C.; Bussmann, W.; Cadilek, M. (2003) Neue Energie vom Bauernhof. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup, Germany.
4. Braun, R. (1982) Biogas – Methangärung organischer Abfallstoffe. Wien.

- 
5. Eder, B.; Schulz, H. (2006) Biogas Praxis. Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit. Ökobuch Magnum, Freiburg.
  6. I. T. T. Flygt GmbH. URL: [www.itt.com](http://www.itt.com) [26.03.2007]
  7. Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (2001) Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
  8. Olt, J.; Annuk, A.; Lepa, J.; Jõgi, E. (2006) Biogaasi tootmistehnoloogiad. *Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine*. Stendiettekanne.
  9. Schattner, S.; Gronauer, A. (2000) Methangärung verschiedener Substrate – Kenntnisstand und offene Fragen, *Gülzower Fachgespräche*, Band 15: Energetische Nutzung von Biogas: *Stand der Technik und Optimierungspotenzial*, Weimar.
  10. Top Agrar Fachbuch. (2002) Biogas Strom aus Gülle und Biomasse. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup, Germany.
  11. Weiland, P. (2001) Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate. VDI-Berichte, Nr. 1620. *Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven*. VDI-Verlag.
  12. Weiland, P.; Rieger, Ch. (2001) Wissenschaftliches Messprogramm zur Bewertung von Biogasanlagen im Landwirtschaftlichen Bereich, 3. wischenbericht; Institut für Technologie und Systemtechnik, Braunschweig.
  13. Wellinger, A.; Baserga, U.; Edelmann, W.; Egger, K.; Seiler, B. (1991) Biogas-Handbuch. Aarau.
  14. Viiralt, R.; Parol, A. (2006) Biogaas rohtsest biomassist I (30.11.2006) *Biogaasi tootmisel kasutatav rohtne biomass ja selle ressurs*. Seminariettekanne.

# Eesti Maaülikooli taastuvenergia keskusest

Elis Vollmer

Taastuvenergia keskuse spetsialist

Eesti Maaülikooli taastuvenergia keskus loodi märtsis 2006. Keskuse eesmärgiks on algatada, koordineerida ja arendada interdistsiplinaarset taastuvenergiaalast teadus- ja arendustegevust, kuna bioenergia valdkonnaga on seotud kõik Eesti Maaülikooli instituudid. Eesti Maaülikooli taastuvenergia keskus ongi loodud taastuvenergia alase tegevuse efektiivsemaks koordineerimiseks ja koostöö süvendamiseks erinevate instituutide vahel. Peamised Maaülikoolis arendatavad uurimissuunad on iseloomustatavad järgnevate märksõnadega.

- **Rohtne biomass.** Biomass rohttaimedest ja traditsioonilistest põllukultuuridest ning selle kasutamine biokütusena (nt pilliroog, päideroog, ida-kitsehernes, roog-aruhein, kerahein, timut, raps jms). Pool-looduslike koosluste produktsioon ja majandamine.
- **Biogaas.** Eesti rohtse biomassi ja jäätmete biokonversioon ja biogaasi tootmine.
- **Energiavõsad ja kiirekasvulised puuliigid.** Kiirekasvuliste pajuliikide energiovõsa kasvatamis- ja kasutamisevõimalused. Taimede produktsioon ja ökofüsioloogia. Taimkattefiltrid. Eesti ressursid biomassi tootmiseks energiaallikana. Kiirekasvuliste lehtpuude (hall lepp, sanglepp, arukask, hübriidhaab, triploidne haab) kasvatamine endistel põllumajandusmaadel, biomass lühikese raieringiga energiakultuuridest ja looduslikult tekkinud võsast endistel põllumajandusmaadel, lühikese raieringiga metsanduse ressursi- ja tasuvusuuringud.
- **Biomass metsamajandusest.** Biomass traditsioonilisest metsamajandusest (nt raiejäätmel uuendus- ja harvendusraietest, elektriliinide all ja kraavitrassidel kasvav võsa), biokütuste ressurss ja tootmistehnoloogiad.
- **Tehnoloogilised lahendused taastuvenergia tootmisel ja kasutamisel.** Biomassi koristuse ja koristusjärgse töötlemise tehnoloogiad. Taastuvenergia tootmine ja kasutamine.
- **Majanduslikud ja sotsiaalsed aspektid biokütuste tootmisel ja kasutamisel.** Maamajanduse uuringud, põllumajandustoodangu omahinna- ja turuanalüüsid ning ettevõtete majandusanalüüsid.

EMÜ taastuvenergia keskus korraldab ka mitmeid taastuvenergia alaseid seminare ja konverentse, suurim neist on konverents *Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine* (TEUK), mis 2007. a toimub juba üheksandat korda.

Lisainfot keskuse ja tegevuste kohta leiab kodulehelt: [www.emu.ee/TEK/](http://www.emu.ee/TEK/)

# Eesti Noorte Teadlaste Akadeemiast

Dmitri Teperik

Eesti Noorte Teadlaste Akadeemia juhatuse esimees

Eesti Noorte Teadlaste Akadeemia (ENTA) asutati 31. jaanuaril 2005. ENTA ei eelista ühtki teadusvaldkonda ning püüab kaasata kõikide teadusalade noorteadlasi. Selline kirju liikmeskond võimaldab paremini täita seatud eesmärgid, millest peamised on:

- esindada ja kaitsta Eesti noorte teadlaste huve nii riigisiselt kui ka Euroopa ning maailma tasandil;
- propageerida ühiskondlike protsesside teaduspõhilist analüüsi;
- soodustada Eesti ja maailma teaduse integratsiooni;
- levitada noorteadlaste karjääriks olulist infot, korraldades selleks vajalikke sündmusi;
- tõsta noorte teadlaste osatähtsust Eesti, Euroopa ja maailma tasandil;
- toetada noorte teadlaste püüdlusi uute teadmiste omandamisel, tagades asjakohase temaatilise koolituse;
- kaasata noorteadlasi ühiskondlikult olulistesse aruteludesse ning otsustusprotsessidesse nii Eestis, Euroopas kui ka maailmas;
- initsieerida ja läbi viia uurimusi aktuaalsetel teadus- ja kõrghariduse teemadel;
- tihendada koostööd teadus-, kõrghariduse- ja noorsoopoliitikaga tegelevate riigiasutuste, mittetulundusühingute ja organisatsioonide vahel.

ENTA tegevus põhineb arusaamal, et noorteadlane on võrdväärne osaleja kõrgharidus- ning teadusprotsessis, kellel peab olema huvi ja õigus avaldada oma argumenteeritud arvamust toimuva kohta, mõjutada protsessi selle parendamiseks, käivitada vajalikke läbirääkimisi ning enda huvisid selgelt deklareerida.

Esimesel kolmel aastal oli ENTA-l väga intensiivne ning üritusrohke periood. Liikmeskond kasvas kiiresti, tekkisid uued välispartnerid (*Eurodoc* - Euroopa doktorantide ja noorteadlaste nõukogu [www.eurodoc.net](http://www.eurodoc.net), *LJMS* - Leedu Noorte Teadlaste Liit <http://ljms.lms.lt>, *LJZA* - Läti Noorte Teadlaste Assotsiatsioon [www.ljza.lv](http://www.ljza.lv), *WAYS* - Maailma Noorte Teadlaste Akadeemia [www.waysnet.org](http://www.waysnet.org) jt), tehti koostööd ka riigisiselt. Alates aastast 2006 on ENTA esindaja kaasatud Eesti riikliku õpilaste teadustööde konkursi hindamiskomisjoni töösse. ENTA toetab andekaid noorteadlasi eripreemiaga. Samuti osaleb ENTA esindaja Eesti Teaduspopulariseerimise Auhinna hindamiskomisjoni töös. Aastal 2006 kutsuti ENTA esindaja Stockholmi Veeauhinna uurimistööde konkursi Eesti eelvooru žüriisse.

ENTA mainekamatest projektidest tasub meenutada järgnevaid.

1. 2005. aasta mais Leedu Vabariigi Parlamendis toimunud Eesti-Leedu ümarlaua diskussioon teemal *Noorte roll teaduse populariseerimises*.
2. 2005. aasta novembris rahvusvaheline seminar noorteadlaste mobiilsusest, vt URL: <http://www.enta.ee/2005/mobility>.
3. 2006. aasta aprillis koostöös Eesti Maaülikooliga korraldatud teaduslookonverents, mille raames toimus ka noorte teadlaste teadustööde konkurss, vt URL: <http://baer.emu.ee/177950>.



4. 2006. aasta oktoobris projekt rahvusvahemuste ootustest ja võimalustest Eesti kõrghariduse ja teaduse maastikul, vt URL: <http://www.enta.ee/integra>.
5. 2007. aastal rahvusvaheline koolitusprojekt noorteadlaste juhtimisoskuste ja mobiilsuse temaatika arendamisest, vt URL: <http://www.enta.ee/baltmob>.

Kolme aasta jooksul osalesid ENTA liikmed erinevates välisüritustes Lätis, Leedus, Soomes, Taanis, Türgis, Makedoonias, Bosnias ja Hertsegoviinas, Saksamaal, Suurbritannias, Ukrainas, Moldovas, Ungaris, Prantsusmaal ja Itaalias. Noorteadlaste mobiilsus, nende motivatsiooni uurimine, juhtimisoskused, võrdõiguslikkus teaduses ja mõned teisedki teemad on kujunenud ENTA välissuhetes peamisteks ühistöö teemadeks.

Olulised ENTA tööd käsitlevad artiklid:

- **Leuhin, I.** (2007) Mõtteviisist ja infokriisist. *Sirp*, 20 (3157). 11.05.2007
- **Pihlak, M., Teperik, D.** (2005) Euroopa doktorantide võrgustik. Konverentsi kogumik. *Tallinna Ülikooli sotsiaal- ja kasvatusteaduste doktorantide III teaduskonverents*. 21...22. aprill 2005
- **Pihlak, M., Teperik, D.** (2005) Mobiilsus on oluline teadmiste kogumise vahend. *Tallinna Ülikooli ajaleht*, aprill 2005 (1)
- **Senkiv G.** (2006) Noorteadlastel on integratsiooniprotsessidest uus nägemus. (vene keeles) У молодых ученых новое видение интеграционных процессов. *Põhjarannik*. 31.08.2006
- **Teperik, D.** (2005) Eesti kogemusi teaduse populariseerimisel väärtustavad ka naabrid. *Horisont*, 4. Juuli, 2005
- **Teperik, D.** (2007) Eesti noorteadlaste on üritusrohke periood. *Horisondi uudised*, vt URL: <http://www.loodusajakiri.ee/horisont/uudised100.html> [28.10.2007]
- **Teperik, D.** (2006) International research ethics course for young scientists: objectives and substance. *Abstract in the proceedings of the EMBO/HHMI Central European Scientists Meeting*. 2006, June 15...17, Dubrovnik, Croatia
- **Teperik, D. Mikhailov, S.** (2005) Academic mobility: substance, reasons and target groups. *Full article in proceedings of the International Seminar on Young researchers' Mobility*. November, 18...20. Tallinn, Estonia.
- **Teperik, D.** (2007) Noored väärtustavad teaduse populariseerimist. *Horisondi uudised*, vt URL: <http://www.loodusajakiri.ee/horisont/uudised80.html> [28.10.2007]
- **Teperik, D.** (2005) Promoting science by young scientists in general society. *Thesis in the proceedings of the EMBO/HHMI Central European Scientists Meeting*. February, 7...9, Budapest, Hungary
- **Teperik, D.** (2006) Teadusteave – idaeurooplased on teadushimulised. *Horisont*, 1. Jaanuar, 2006
- **Teperik, D.** (2005) Õpilasteadus - kas väljakutse haridusele? *Õpetajate Leht*, 32. 16.09.2005.
- **Teperik, D.** (2005) Õppekavaväline aktiivsus – kas seni kasutamata lisavõimalus perspektiivikale kraadiõppurile? *Seminari materjalid I. Eesti doktoriõppe kvaliteedi, tulemuslikkuse ja jätkusuutlikkuse tagamise süsteem*. Tartu. 26. okt. 2005.
- **Teperik, D., Pihlak, M.** (2005) EuroDoc - Euroopa doktorantide võrgustik. *Universitas Tartuensis*, 6.05.2005
- **Teperik, D.; Kaseorg, K.** (2006) Millest räägiti Euroopa Teaduse Avatud Foorumil? *Horisont*, 5. 09.2006
- **Teperik, D.; Leuhin, I.; Uibu, J.; Toomri, U.** (toim.) (2006) Lõimumine läbi kõrghariduse ja teaduse? Miks mitte! *Rahvusvahemustest noorte tee eesti teaduses ja kõrghariduses - ootused ja müüdid*. Tartu: Eesti Noorte Teadlaste Akadeemia, 2006
- **Toomri, U.; Leuhin, I.** (2007) Eesti kõrgharidusest ja teadusest siinsete vene noorte silmadega. *Sirp*, 6 (3143). 9.02.2007